Mécanisation, automation, robotisation

Jean Dunglas
Membre de l'Académie d'agriculture de France

Manuscrit révisé le 22 octobre 2012 - Publié le 28 octobre 2013

Résumé *: Les progrès actuels dans le domaine de l'automatisation et de la robotique sont particulièrement rapides et saisissants. Ils participent des avancées de la technologie dans la plupart des sciences de l'ingénieur et peuvent apporter beaucoup dans le développement d'une agriculture efficace et durable.*

Les réalisations présentes déjà étonnantes tant en agriculture, qu'en élevage et en foresterie sont issues d'une évolution continue depuis des siècles. L'accélération de l'apparition des nouveautés a déjà entraîné de changements fondamentaux tant sociaux qu'économiques. Les perspectives d'avenir sont tellement importantes et multiples qu'il convient d'essayer de les explorer pour éclairer les choix et discerner les conséquences, en particulier sur les structures de la société.

Remarque : les mots en bleu sont des liens internet.

Brève histoire de la mécanisation

La *mécanisation* est, à la fois, l'action de mécaniser et son résultat. Elle définit le développement rapide et la généralisation des machines au 18ème siècle en Europe, à des périodes différentes selon les secteurs, les régions et les pays. Elle a bouleversé les méthodes de production de l'industrie et de l'agriculture.

Le processus de mécanisation a commencé, dès l'Antiquité, par l'apparition progressive des machines simples. Il s'agissait de dispositifs élémentaires permettant de transformer une force d'intensité et de direction déterminées en une force dont l'intensité ou la direction sont différentes.

Aux origines de la mécanisation

Trois siècles avant notre ère, Archimède, avait inventé diverses machines, en particulier la roue dentée, le palan, la vis sans fin, ainsi que des machines de guerre bien plus complexes, en particulier la grue à grappin et la catapulte. Au premier siècle, Héron d'Alexandrie distinguait 5 machines simples : le levier, la poulie, le coin, le treuil et la vis sans fin. Actuellement on en cite huit, en y ajoutant, la roue, le plan incliné et les engrenages.

Les engrenages dérivant de la roue dentée ont été d'apparition un peu plus tardive car ils nécessitent un savoir-faire de la taille des dents acquis progressivement. L'objet appelé "mécanisme d'Anticythère", qui est une sorte de calculatrice mécanique antique, découvert en 1900 dans une épave près des côtes de l'île grecque du même nom, est le plus ancien système complexe d'engrenages connu. Daté de 87 av J.C. l'appareil, de dimension relativement modeste, est en bronze et ses engrenages (une trentaine) montrent une finesse et une précision de taille remarquable. Bien que dispersé en plus de quatre-vingt morceaux, il a pu être reconstitué. Il comportait des systèmes d'engrenages épicycloïdaux modélisant les mouvements apparents des astres et l'on estime qu'il était destiné à calculer les positions du Soleil, de la Lune et de ses phases, ainsi que de plusieurs planètes.

Dans le Xème livre de son *De Architectura,* l'ingénieur romain Vitruve (Ier siècle av. J.C.) décrivait en détail les différentes machines utilisées en son temps et dont la plupart étaient encore en usage courant en 1673 quand Claude Perrault en publia une traduction célèbre.

La mécanisation, à l'origine de l'industrialisation en Europe, visait d'abord à augmenter la productivité et à se libérer de diverses contraintes techniques. Les industries du textile et de la fabrication des armes ont été les premières à se mécaniser. L'invention de la navette au 18ème siècle a fortement facilité la fabrication des tissus, mais le filage restait réalisé à domicile, par des femmes, au moyen d'un rouet. Samuel Crompton inventa la première machine à filer en 1779 ; elle ne pouvait être utilisée qu'en usine ce qui entraîna la fin du travail à domicile, mais la productivité et la qualité du produit en étaient grandement améliorées. La fabrication des canons des armes à feu s'est aussi rapidement mécanisée au 17ème siècle essentiellement pour des raisons de normalisation des calibres et de précision du tournage.

Durant l'antiquité, la *force motrice* était essentiellement fournie par des êtres humains et des animaux de trait. La "cage à écureuil" pour l'entraînement des engins de levage et les grands cabestans pour le tirage des charges lourdes en sont des exemples classiques.

L'arrivée de races de chevaux plus lourds et plus musclés (d'origine germanique) associée à l'invention du collier d'épaule et du fer à cheval a permis à cet animal d'être progressivement utilisé en agriculture et pour les transports, pour remplacer les attelages de bœufs. L'invention puis le perfectionnement de la charrue à soc et versoir avec un châssis porté par des roues a également accéléré l'utilisation du cheval mieux adapté à cet outil.

Le cas des navires à voile mis à part, l'utilisation d'une énergie non animale ni humaine a été beaucoup plus longue à se développer. *L'éolipyle* de Héron d'Alexandrie était une machine à vapeur à réaction, fonctionnant grâce à 2 jets de vapeur diamétralement opposés sortant d'une boule métallique, tournant elle-même et reliée à un réservoir rempli d'eau chauffé par un feu. Elle n'eut pratiquement aucune application.

La *roue à eau* existait en Europe depuis l'antiquité et est antérieure au moulin à vent. Au Moyen Âge, le *moulin à eau* s'est rapidement développé parallèlement à la disparition de l'esclavage puis du servage. L'utilisation de l'énergie hydraulique permettait une productivité très supérieure et servait surtout à l'élaboration de la farine, ainsi que pour le sciage, le tissage et la forge.

Le *moulin à vent* existait déjà en Egypte au moment de la domination romaine. Il s'est développé en Iran au 7ème siècle sous la forme d'une machine à axe vertical enfermée dans une tour ajourée. Les premiers moulins à vent européens à axe horizontal sont apparus en Grande Bretagne au 9ème siècle. Ils se sont rapidement étendus à tout le continent à partir des zones côtières, les plus ventées. Ils étaient essentiellement utilisés pour moudre les céréales. Ils ont été également utilisés pour entraîner des pompes, en particulier en Hollande pour vider les polders.

La *machine à vapeur* est née des travaux de plusieurs inventeurs, parmi lesquels Denis Papin en France. James Watt lui apporta ses derniers perfectionnements, les plus importants qui la rendirent réellement efficace. *La machine à vapeur est la première machine fournissant de l'énergie mécanique extérieure contrôlable par l'homme* (les machines précédentes étaient soumises aux vents, à l'eau ou à la force animale). C'était, en fait, une véritable révolution dans le rapport de l'homme à la nature. Ces machines ont été rapidement mises en œuvre dans le textile, la métallurgie et dans les mines (pompage de l'eau, remontage des charges). Elles bouleversèrent les techniques de transport. La première locomotive à vapeur date de 1804 et la première ligne de chemin de fer pour passagers a été ouverte en Angleterre en 1825, le tout suivi de peu par les systèmes de propulsion adaptés aux gros navires (roue à aubes).

Ces réussites ont permis le transport en masse du charbon, dont la consommation a augmenté alors à un rythme accéléré ainsi que celle des matériaux pondéreux.

Le cas du machinisme agricole

Dans sa définition classique, le *machinisme agricole* désigne l'ensemble des doctrines, économiques ou industrielles visant à développer l'utilisation des machines ou d'instruments mécaniques en remplacement de la main-d'œuvre dans les activités agricoles.

Au-delà de l'invention de la charrue moderne et des divers outils adaptés à la traction animale, le machinisme agricole, a commencé à changer vraiment avec la machine à vapeur. L'un de ses promoteurs en France fut un fils d'agriculteurs, Célestin Gérard qui exposa, en 1854, sa première batteuse portative à Bourges. Il construisit sa première locomobile en 1861 et la première batteuse mobile à vapeur en 1866.

Le changement s'est ensuite accéléré, vers la fin du 19ème siècle, avec l'apparition du moteur à combustion interne et plus récemment avec les transmissions hydrauliques et le moteur électrique.

Cependant, la mécanisation des zones rurales fut plus lente que celle des villes dans tout le monde européen. En 1887, Zola, dans son roman "*La Terre*", fortement critiqué pour son pessimisme sur la mentalité paysanne, décrivait une France rurale de petits propriétaires essentiellement attachés au foncier et très hostiles aux machines. Le retard de l'agriculture était lié en grande partie à l'époque aux structures traditionnelles des exploitations. Le modèle de la ferme vivrière, familiale et de petite taille, commençait à disparaître. Il était incompatible avec la mécanisation agricole du fait des coûts d'achat

et d'entretien très élevé des matériels et de la nécessité d'un savoir-faire particulier pour leur maintenance. A l'époque, seules les très grandes exploitations pouvaient se permettre d'investir dans des matériels efficaces mais coûteux.

Dans les années vingt, le progrès s'est trouvé fortement amplifié du fait des nouveautés mécaniques apparues durant la Première Guerre mondiale. Après le conflit, les fabricants de matériel militaire se sont reconvertis dans le domaine du machinisme agricole et forestier. Parallèlement, les fabricants de poudre et explosifs passaient à la fabrication d'engrais à base de nitrates et certains industriels de la chimie commençaient à élaborer des produits phytopharmaceutiques. *Le machinisme, après les hostilités, a alors pu être présenté comme une solution pour répondre au manque de main d'œuvre et aux besoins urgents de reconstruction du pays.*

En 1929, on pouvait lire dans une revue agricole : « De formidables progrès techniques sont révélés à un moment où le monde rural, pressé de s'équiper, ne peut le faire à son gré, alors que, dans l'intérêt et par l'effort de tous, il importe d'accroître la capacité d'absorption du marché ». La sylviculture commençait, également, à s'équiper d'engins de plus en plus puissants et lourds. Toutefois, entre les deux guerres, et en particulier dans notre pays, la mécanisation s'est poursuivie assez lentement, en conservant pour beaucoup d'activités la traction animale (essentiellement par chevaux). A noter que les locotracteurs à vapeur n'ont eu qu'une existence éphémère. De façon plus large, durant cette période, la motorisation a progressé beaucoup plus rapidement en Amérique du Nord qu'en Europe.

Dès la fin des années quarante, sous le double effet de l'arrivée massive, grâce au plan Marshall, de machines américaines très performantes pour l'époque, et d'une demande intense en produits agricoles, mécanisation et motorisation se sont développées de manière beaucoup plus rapide. Il en est résulté, durant les "trente glorieuses", un accroissement considérable de la productivité par travailleur qui a eu de profondes conséquences sur l'organisation des exploitations agricoles.

La main-d'œuvre d'appoint saisonnier s'est progressivement réduite, et a même disparu totalement dans bien des cas ; la dimension économiquement optimale de la ferme a augmenté sans cesse, conduisant à un accroissement de la taille moyenne et à une réduction équivalente du nombre d'exploitations, ainsi qu'à un remodelage du paysage suivant l'accroissement de la surface des parcelles cultivées. Le besoin de capital a continué à s'accroitre, pour suivre le progrès technique et financer l'augmentation de la taille de l'exploitation. Dans le même temps, la population agricole s'est réduite, avec toutes les conséquences sociales qui en découlent.

Parallèlement, il a toujours persisté un courant de pensée, très minoritaire, qui a critiqué cette évolution, en soulignant ses effets négatifs :

Telle pourrait être, selon ces vues, l'agriculture du futur, durable, économe en énergie et respectueuse de l'environnement.

- Le gain de productivité amène pertes d'emplois, et agrandissement des exploitations.
- L'exode rural détruit la structure sociale rurale basée sur la petite paysannerie.
- Les besoins en investissements conduisent au surendettement.
- L'artificialisation de l'agriculture, avec les aménagements fonciers qui en résultent (remembrement, drainage, etc.), apparaît de plus en plus comme une atteinte à la nature et à l'environnement.

Cette critique du machinisme fait partie d'un mouvement de plus en plus répandu et affirmé de remise en cause de l'agriculture qualifiée d'intensive. Pour remédier aux inconvénients allégués, d'autres pratiques culturales sont vantées : agriculture sans labour, volonté de se réapproprier le capital représenté par le matériel agricole, promotion de la traction animale présentée comme durable et écologique, structures agraires alternatives.

Automates et robots

Automatisation, Automation

L'*automation* a d'abord signifié l'utilisation d'un logiciel dans une application. Plus tard et plus largement, l'automation est devenue, grâce à l'informatique, le moyen d'utiliser les machines afin de réduire la charge de travail tout en préservant la productivité et la qualité. Elle fait appel à des systèmes mécatroniques qui intègrent toute la hiérarchie de la chaîne de contrôle-commande depuis les capteurs de mesure, en passant par les automates, les circuits de communication, la visualisation, l'archivage ainsi que la gestion de production et des ressources de l'entreprise. L'automation aboutit finalement à "*une technique qui assure le fonctionnement d'une machine ou d'un groupe de machine* sans *intervention humaine*". En d'autres termes, l'automation vise à substituer le travail d'une machine ou d'un groupe de machines à celui d'un ou plusieurs ouvriers.

Souvent associée à la robotisation, l'automation utilise des systèmes informatiques (ordinateurs, microprocesseurs) et des automates programmables pour guider et donner des ordres aux machines.

En matière agricole, les outillages de l'après-guerre, adaptés aux tracteurs, voyaient progressivement apparaître de nombreux automatismes animés par des ensembles de commande et de transmission hydrauliques. L'un des plus connus a été le système de contrôle de la profondeur de labour des charrues portées par l'attelage "3 points".

Parallèlement, les moteurs (essentiellement diesels) étaient progressivement munis de mécanismes automatiques de régulation destinés à réduire leur consommation et optimiser leur fonctionnement en agissant à la fois sur l'alimentation par injection et sur la pression d'admission fournie par le turbocompresseur. Ces moteurs sont maintenant presque systématiquement associés à des transmissions entièrement automatiques qui simplifient considérablement le travail du conducteur.

Attelage à trois points

L'attelage 3 points a représenté une avancée considérable en machinisme agricole en permettant de faire porter par le tracteur les outils qu'il peut emmener tout en en contrôlant le positionnement et en assurant leur stabilité.

Deux points sont représentés par les bras supérieurs qui assurent la transmission de la traction et le relevage de l'outil. Le 3ème point, bras central, contrôle la stabilité.

Les attelages trois-points sont composés de trois bras mobiles. Les deux bras extérieurs qui servent au levage de l'outil, sont mus par le système hydraulique. Ils contrôlent la montée, la descente et l'inclinaison de l'outil. Le bras central est mobile, mais peut ne pas être commandé par le circuit hydraulique. Chaque bras comprend un dispositif de fixation de l'outil. L'attelage 3 points est dynamiquement stable. Il a comme principal avantage de transférer le poids et l'effort de l'outil sur les roues arrière du tracteur.

Harry Ferguson a breveté l'attelage trois-points en 1926. Il a mis ainsi en évidence l'importance d'une fixation rigide de la charrue au tracteur. Plusieurs innovations ont complété le dispositif, en particulier la commande hydraulique, et en ont fait un système pratique et efficace. Actuellement, presque tous les constructeurs ont adopté des formes standardisées de l'attelage à trois points moderne.

Robots et Robotique – Concepts et définitions

Un *robot* est un dispositif alliant mécanique, électronique et informatique accomplissant par lui-même soit des tâches qui sont généralement dangereuses, pénibles, répétitives ou impossibles pour les humains, soit des tâches plus simples mais en les réalisant mieux que ce que ferait un être humain. Les robots les plus évolués sont capables de se déplacer et de se recharger eux-mêmes en énergie. Cela étant, *il n'y a pas de frontière nette entre l'automate et le robot*.

L'*automate* serait plutôt une machine programmée pour un comportement répétitif dans un environnement constant (de l'automate de Vaucanson à l'appareil à distribuer les tickets de métro). Le *robot* est destiné à effectuer des tâches beaucoup plus variées dans un environnement changeant donc en étant doué d'une capacité d'indépendance, de discernement et de choix dans son comportement. Dans ce sens, la sonde spatiale "Curiosity" de la Nasa qui s'est posée sur la surface de Mars en août 2012, qui s'y déplace et travaille à des tâches complexes d'exploration, de relevés et d'analyses, et qui ne peut être télécommandée en direct du fait du temps de parcours des ondes radio, est un *vrai robot*, au sens complet du terme.

Les robots sont constitués classiquement d'un châssis porteur, d'une source d'énergie mécanique ou électrique, de capteurs (optiques, sonores, chimiques, de contact), d'actuateurs (bras mobiles) munis de préhenseurs ou d'outils spécialisés (de travail, d'analyse, etc.), et d'ordinateurs équipés de logiciels permettant une série de comportements et possédant même des capacités d'apprentissage. Si l'on met à part les *robots industriels dont la plupart sont plutôt des automates fixes très perfectionnés,* les robots sont mobiles et doués d'une certaine autonomie. Les robots peuvent être aériens, sous-marins, spatiaux ou terrestres. Au sol ils peuvent se déplacer essentiellement par des roues ou des chenilles. Les robots se déplaçant sur des pattes sont une voie d'avenir en plein développement.

Les robots se sont imposés dans l'industrie dès le début des années 1970, en continuité avec les machines automatiques à commande numérique pour certaines tâches comme la peinture des carrosseries automobiles, en atmosphère de vapeurs toxiques.

Depuis, l'évolution de l'électronique et de l'informatique permet aux robots de réaliser des tâches de complexité croissante, avec de plus en plus d'autonomie, et de plus en plus rapidement.

La **Robotique** est la science des robots c'est-à-dire l'ensemble des études et des techniques de conception et de mise en œuvre des robots. Les champs de la robotique ont tendance à recouvrir la plupart des activités humaines. Actuellement, *au-delà de la robotique industrielle qui continue à progresser vigoureusement*, les domaines les plus en pointe tant au niveau de la recherche que celui des applications sont les suivants :

- *La robotique domestique,* associée à la *domotique* (automatisation de la maison) représente, à terme, un marché gigantesque.
- *La robotique militaire* qui séduit les décideurs car elle signifie moins de pertes humaines et de nombreuses économies en équipements. L'une des branches de ce domaine, qui se développe le plus vite, concerne les avions robots appelés souvent de leur nom américain "drones" (encadré page suivante).
- *La robotique spatiale* qui est une nécessité impérative pour l'exploration de l'espace extraterrestre compte tenu des environnements extrêmes, de l'éloignement qui interdit la télécommande directe, de la possibilité de miniaturisation et d'économie de poids ainsi que d'équipements résultant de l'absence d'équipage.
- *La robotique sous-marine* pour les des raisons analogues à celles de la robotique spatiale et qui a permis des activités spectaculaires en grande profondeur, encore impensables il y a quelques années.
- *La robotique nucléaire* pour intervenir dans les milieux soumis à de fortes intensité de radiations ionisantes. Ils sont indispensables pour tous les travaux dans les zones dangereuses de l'industrie et de la recherche nucléaire.
- *La robotique en milieu hostile* est une généralisation des cas précédents. Il s'agit de concevoir des robots capables de travailler dans des conditions qui ne pourraient pas être supportées par un

appareillage mécatronique classique ni par des opérateurs humains (environnement chimique toxique ou corrosif, conditions physiques extrêmes de température, de pression, de contraintes électromagnétiques, etc.).

• *La robotique médicale* qui s'est beaucoup développée à partir de la télé-chirurgie et de la microchirurgie (chirurgie très peu invasive).

• *La robotique agricole* qui sera examinée plus loin. Elle a vocation à utiliser beaucoup de technologies développées dans d'autres domaines, en particulier la robotique militaire.

Les drones

Leurs possibles utilisations en agriculture

Les drones militaires sont des avions sans pilote programmables, contrôlables à distance ou totalement autonomes. Ils peuvent servir à divers types de mission mais sont surtout utilisés à la reconnaissance et à des usages tactiques. Plusieurs prototypes destinés spécifiquement au combat aérien sont en cours de développement, en particulier aux Etats-Unis.

Il en existe de toutes les tailles depuis le "Global Hawk" (reconnaissance) de 13 tonnes capable de voler à 650 km/h à près de 20 000 m pendant une quarantaine d'heures, jusqu'à de tout petits engins qui ressemblent beaucoup à des modèles réduits de quelques kg et même des micro drones pesant quelques centaines de grammes capables de pénétrer et évoluer dans des bâtiments.

Les drones les plus utilisés sont actuellement le "Predator" appareil à hélice de taille moyenne destiné essentiellement à l'attaque au sol au moyen de missiles et le "Raven" (corbeau), tout petit avion destiné à la reconnaissance rapprochée.

Le "Raven" est propulsé par un moteur électrique alimenté par une batterie rechargeable. Lancé à la main, il peut voler jusqu'à 95 km/h pendant 80 min sur un rayon d'action de 10 km, à une hauteur de 300 m. Le "Raven" peut être radio commandé depuis le sol ou voler totalement en autonome avec une trajectoire prédéfinie suivie par GPS. Ses missions sont l'observation avec des caméras variées, optiques ou thermiques.

Lancement à la main d'un "Raven"

On pourrait parfaitement envisager l'utilisation de robots de ce type pour des opérations de surveillance, de relevé, de contrôle, de cartographie à l'échelle d'une exploitation agricole. En matière d'élevage en liberté au pré ou en "ranching" le potentiel est évident.

Les évolutions potentielles de la robotique

Chacun des éléments des robots (énergie, actuateurs, capteurs etc.) a ses propres axes de progrès souvent communs à d'autres domaines techniques (par exemple énergie, batteries, moteurs, propulsion, informatique et télécommunication, cinématique des actuateurs, métallurgie…). *Il s'agit de technologies très complexes mobilisant beaucoup de branches des sciences "de l'ingénieur*".

Au-delà, apparaissent quelques voies en pointe :

La micro-robotique est un champ d'étude en plein essor. La compréhension des phénomènes physiques dans la manipulation à l'échelle du micromètre et la miniaturisation des mécanismes sont d'un intérêt crucial pour la micro-ingénierie. Les recherches concernent aussi bien les capteurs que les actionneurs et les préhenseurs.

De nombreux roboticiens se concentrent aujourd'hui sur la *locomotion humaine et animale*. C'est une problématique difficile, en partie à cause de la puissance de calcul nécessaire pour réaliser les capacités de déplacement des êtres vivants. La mise au point de robots à pattes progresse rapidement. La tendance a d'abord été de copier l'adaptabilité des insectes. Aujourd'hui on assiste plutôt à une intensification de la recherche sur la locomotion bipède, dynamiquement stable, plus difficile à maîtriser et sur la locomotion quadrupède favorable à des robots lourds tous terrains.

Dans cette direction, les avantages sont considérables : meilleur franchissement d'obstacle et adaptation à l'environnement humain. Un prototype de robot tétrapode entièrement autonome développé à buts militaires par un constructeur américain s'est révélé capable de capacités tous terrains étonnantes et de vitesses de déplacement, à plat, dépassant les 40 km/h. C'est, en quelque sorte la création d'un cheval robot, ce qui a permis, à certains de douter de son intérêt, le cheval biologique ayant l'avantage de trouver seul et presque partout sa source d'énergie et étant capable de se reproduire !

La *robotique médicale* est en plein essor. De nouveaux robots sont développés pour la chirurgie mini-invasive et la télé-chirurgie. La maîtrise et la précision infra millimétrique du geste sont nécessaires, ainsi que la présence de mini-caméras et de capteurs miniaturisés.

De nouvelles techniques sont exploitées, comme les actionneurs à "alliages à mémoire de forme", les micro-actuateurs et les interfaces "haptiques" (sens du toucher). Des algorithmes d'analyse d'images toujours plus performants sont développés. Dans ce sens, les progrès futurs concernent la vision robotique, notamment dans le but de concevoir des véhicules "intelligents", ou des robots de surveillance et d'exploration.

La recherche s'est aussi orientée vers la *navigation*. Alors que des pilotes automatiques sont installés depuis longtemps dans les avions de ligne et militaires, la recherche ayant pour but de concevoir des véhicules terrestres grand public robotisés se heurte à de nombreux obstacles. La *localisation précise* est devenue aisée grâce au GPS, mais les techniques de reconnaissance d'objets à partir d'images ne permettent pas encore de reconnaître parfaitement les divers panneaux de signalisation routière, ni de distinguer les objets et obstacles présents sur la chaussée ou le trottoir. Le problème essentiel est de donner à un robot la possibilité de faire face à toute une gamme d'imprévus.

La *robotique modulaire* se développe. Elle vise à réunir plusieurs éléments qui s'auto-organisent par reconfigurations dynamiques (matérielles ou logicielles) afin de coopérer pour aboutir à un ensemble susceptible de répondre à un besoin, ce qui permet une adaptation du robot à son environnement selon les tâches qu'on lui attribue.

Une autre voie de développement importante concerne l'*apprentissage des robots*. La plupart des robots actuels ne savent pas s'adapter à une nouvelle situation car on ne leur a pas donné la possibilité d'apprendre et d'améliorer leurs comportements.

Pourtant, des techniques d'apprentissage existent. On connait maintenant les principes d'informatique permettant à un robot d'apprendre et de s'adapter à des configurations non prévues au départ. Les applications de cet axe de recherche sont actuellement en plein essor.

Un domaine à la fois passionnant mais passablement plus inquiétant est celui des *robots biologiques* ou *bio-robots*. Cette technique consisterait à, utiliser un corps animal adapté pour être muni d'extensions mécatroniques et dont le comportement serait contrôlé par un microprocesseur pouvant être lui-même commandé à distance. Le bio-robot aurait l'avantage d'être relativement autonome, discret et même furtif dans l'environnement terrestre, peu couteux et facile à élaborer et multiplier par des techniques classiques d'élevage ou même de clonage. De tels montages auraient déjà été réalisés avec succès, à des fins militaires, sur des mammifères aquatiques comme les dauphins. Certaines perspectives posent encore plus de problèmes éthiques. C'est le cas des "*cyborgs*", humains dont une partie des organes auraient été modifiés pour les adapter à des environnements ou des tâches inenvisageables pour des individus biologiquement normaux.

D'une façon plus générale, *deux grandes orientations* semblent se dessiner dans la robotique future.

La première vise à une intégration aussi complète que possible de l'homme dans un système robotisé plus grand et beaucoup plus puissant (en force, rapidité, mobilité…). Le contrôleur humain ne définit alors que le but à atteindre et les choix importants de comportement et de décision, l'ensemble du fonctionnement des sous-systèmes étant entièrement automatisé. C'est, au fond la reproduction du fonctionnement du corps humain : quiconque marche ou travaille ne se soucie pas du détail du fonctionnement de ses muscles ou de ses yeux. Les données des capteurs, intégrées et pré-analysées, aboutissent au pilote (par ses organes des sens ou, peut-être dans l'avenir directement dans son système nerveux). Celui-ci acquière rapidement la sensation que les capteurs du robot et ses actuateurs sont les prolongements de ses yeux, de ses bras et de ses doigts. Les pilotes de drones de reconnaissance et de combat qui opèrent depuis leur salle de commande, à des milliers de km du champ de bataille confirment tout à fait ce type de sensation. Un homme aux commandes d'un exosquelette motorisé capable d'augmenter sa force physique d'un ou deux ordres de grandeur éprouverait un sentiment analogue.

La seconde cherche à réaliser des machines de plus en plus autonomes et même auto-réparatrices avec des capacités non seulement physiques mais aussi de discernement et de choix de comportement se rapprochant progressivement de celles d'êtres humains. Ce vieux rêve (depuis le "Golem" de la tradition hébraïque, jusqu'aux robots humanoïdes du romancier Asimov) exerce, à l'évidence, une influence considérable sur les concepteurs de robots. La technologie actuelle est encore très loin d'avoir une telle capacité mais beaucoup de recherches vont clairement dans cette direction. En attendant, quand l'apparence humanoïde n'est pas visée, il s'agit de réaliser la machine la plus autonome et la plus performante possible pour une série de tâches déterminées.

Ethique et droit de la robotique

En matière d'éthique, le robot est une machine entièrement nouvelle par son autonomie, ses capacités d'interaction et d'apprentissage, par la nature des tâches réalisées complexes, potentiellement dangereuses et proches ou semblables à celles dévolues aux humains. Il s'ensuit des situations sans précédents, même par les sentiments qu'elles inspirent. De ce fait, dans un contexte d'utilisation croissante, de la tondeuse à gazon autonome aux drones sophistiqués, en passant par la rame de métro sans conducteur, ou l'assistance à opération chirurgicale, les notions de responsabilité morale et juridique liées à l'utilisation de robots posent des questions éthiques inédites et assez fondamentales. Cela se produira notamment en cas d'accidents, d'effets sur l'environnement ou la santé, voire d'attaque volontaire (robots militaires, robots d'observations, d'enquêtes ou utilisés pour des intrusions, ou encore pour provoquer ou réprimer des mouvements de foule ou d'individus).

En ce qui concerne le droit, plus l'outil robotisé disposera d'autonomie de déplacement et de choix d'action, plus il bouleversera les droits nationaux et internationaux et compliquera la tâche de juger de l'intention du fabricant, du programmeur ou de l'utilisateur d'un robot dont l'action aurait eu des conséquences dommageables. Le robot qui se retourne contre son fabricant ou son propriétaire, ou qui prend une autonomie inattendue est un thème de choix de la science-fiction, mais il intéresse aussi les militaires. Dans ce cadre, la nécessité de développer de nouveaux éléments juridiques apparaît évidente.

Au-delà, divers problèmes moraux et environnementaux vont probablement apparaître du fait des nanotechnologies et du développement de robots très miniaturisé (nanorobots) voire dans un futur plus ou moins proche par les bio-nano-robots (les bio-robots de taille normale pouvant être éventuellement traités comme les animaux domestiques).

La robotique agricole

L'arrivée des robots en agriculture représente l'évolution normale de l'automatisation de plus en plus poussée des divers types de machines agricoles et marque la tendance à rechercher la diminution des temps de travail dans les opérations de préparation des sols, de semis, de traitement mécanique ou chimique des espaces en culture, de récolte, de conditionnement des produits. Curieusement et par plusieurs aspects la robotique agricole se heurte à des problèmes proches de ceux de la robotique militaire (robustesse et rusticité, adaptation à un environnement extérieur éventuellement difficile, facilité d'emploi, autonomie de propulsion et de positionnement, facilité de réparation). La robotique agricole se développe actuellement de manière particulièrement foisonnante et rapide, les constructeurs essayant d'adapter la quantité considérable de nouveautés qui apparaissent tous les jours en provenance des recherches menées dans les autres domaines :

- En *agriculture* on vise surtout à augmenter la productivité à l'unité de surface en minimisant les intrants, en particulier les engrais et produits phytosanitaires.
- En *matière d'élevage*, il s'agit de soulager le plus possible l'exploitant dans ses tâches les plus longues, répétitives et astreignantes (*e.g.* traite, alimentation), rebutantes (nettoyage des locaux, évacuation et traitement des déchets solides et liquides) et même gestion des troupeaux au pâturage. On cherche à augmenter la productivité et la qualité des produits.
- En *foresterie* la robotique cherche à soulager le sylviculteur pour l'élagage, l'abattage, l'ébranchage et le débardage là encore en visant également la diminution des prix de revient.

- L'*horticulture* sous serre qui bénéficie déjà de dispositifs largement automatisés tend à évoluer vers des serres presque totalement autonomes.
- L'*irrigation* par aspersion et l'irrigation localisée se prêtent fort bien à une automatisation quasi-totale.
- En *industrie agro-alimentaire*, les avancées de la robotique sont comparables et analogues à celles observées dans d'autres domaines industriels.

Robots de cueillette de pommes et d'agrumes

Prototype de robot cueilleur d'agrumes "Citrus"

Le robot de cueillette "Magali" est une machine autonome capable de se déplacer dans un verger et qui assure la cueillette automatique des pommes. Il a commencé à être développé par le CEMAGREF en 1985. Il est muni de deux bras-vision assurant la détection et la prise des fruits dans les arbres.

L'ensemble est relativement complexe : il permet à la fois de localiser et de déterminer par une caméra de vision artificielle la position et l'état de maturité d'un fruit dans un arbre, dans le verger, puis de guider le bras pour atteindre le fruit avec précision et de le cueillir (avec son pédoncule) à l'aide du bras muni d'un entonnoir aspirateur. Le système de vision fonctionne à partir de séquences de photos prises au flash. Le guidage de la locomotion dans le verger et le positionnement devant chaque arbre sont assurés par des radars à ultra-sons.

Le robot "Citrus" issu également des travaux du CEMAGREF, et destiné à la cueillette des oranges, dérive directement de "Magali". Il en diffère par le système de détection et d'appréciation des fruits ainsi que par le mécanisme de préhension.

Les 2 robots ont été développé par le CEMAGREF en partenariat avec le constructeur "Pellenc et Motte", ainsi que la collaboration scientifique de la SAGEM, du CEA et de l'Institut Espagnol de Recherches Agricoles de Valencia (IVIA). Ces 2 projets, très en avance (sans doute trop) sur l'état de l'art en robotique agricole à leur époque en 1996, ont vu leur industrialisation freinée puis bloquée par la chute des cours du marché des fruits et la faiblesse du coût de la main d'œuvre saisonnière (importée) employée à la cueillette.

L'expérience et le savoir-faire acquis représentaient, à l'évidence, un capital intellectuel considérable qui pourrait trouver à s'utiliser dans l'avenir. Il est à craindre que, du fait de la dispersion des équipes et des archives, ce savoir- faire finisse progressivement par se perdre.

Quelques résultats et perspectives

Travaux récents du CEMAGREF (IRSTEA)

Le CEMAGREF (devenu depuis novembre 2011 l'IRSTEA) a commencé dès le début des années 1980 à travailler de manière intensive sur l'automatisation de plus en plus poussée des tracteurs ainsi que sur la robotisation des semoirs d'engrais, des distributeurs de produits de traitement et enfin de la cueillette des fruits. Ces travaux ont été facilités par les progrès rapides des microprocesseurs avec ses logiciels de reconnaissance de forme et de couleur, des capteurs et caméras optiques, et thermiques, des dispositifs de repérage ultrasonores, du GPS pour la localisation topographique (précision centimétrique en GPS différentiel), des actuateurs et préhenseurs, et des outils d'analyse physique et chimique légers, automatisés et performants. Durant les années 1980/1990 des progrès considérables avaient été réalisés principalement dans les domaines suivants :

- *Stalle de traite et d'alimentation entièrement automatique* fonctionnant à la demande de l'animal avec identification, bras trayeur robotisé, analyse instantanée du lait, prise de température du pis pour repérage des mammites, distribution de la ration en fonction des besoins instantanés et des repas consommés dans la journée, puis mise en réservoir réfrigéré du lait. Ces travaux menés en parallèle avec divers constructeurs ont abouti vers la fin des années 90 à la mise sur le marché de matériels efficaces quoiqu'encore relativement coûteux.
- *Automatisation de plus en plus poussée des diverses fonctions des tracteurs* en collaboration avec un important constructeur français.
- *Robot de cueillette de fruits*. Un prototype, le robot "Magali" "a fonctionné de façon étonnamment satisfaisante en cueillette de pommes dans divers vergers provençaux. Le coût du matériel et la faiblesse du marché de la pomme ont freiné brutalement le développement de cette filière. Le robot "Citrus", dérivé du précédent, était destiné à la récolte des oranges.

- *Robot de tri des melons à la qualité* basé sur la teneur en sucre et l'acidité grâce à un dispositif d'analyse spectrale ultra rapide non destructif. Ce dispositif a été vendu à une grande chaîne de distribution.
- *Robot de tri des plantes et fleurs en pot* basé sur un dispositif optronique de reconnaissance.
- *Robot d'élagage forestier*.
- *Automatisation de l'irrigation*.

La plupart de ces développements ont été brevetés et passés aux industriels intéressés. La relative faiblesse de l'industrie du machinisme agricole français et le niveau resté très bas des cours des produits agricoles n'ont pas permis une exploitation de ces avancées aussi importante qu'on aurait pu le souhaiter.

Recherches en cours de l'IRSTEA

L'évolution de l'établissement vers la recherche dans le domaine de l'eau et de l'environnement, sous l'impulsion des pouvoirs publics, a diminué l'importance relative de la robotique agricole dans les programmes. Les nouveaux programmes ont amené à infléchir les thèmes d'étude des équipes dans d'autres directions, en particulier diminution des pollutions qui s'inscrivent dans le thème de recherche INSPIRE dont l'objet est de répondre aux enjeux de gestion durable des ressources en concevant des procédés et systèmes innovants alliant progrès technologiques et qualité environnementale.

Le résultat partiel de ces travaux, à savoir une plateforme autonome robotisée, a été présenté à Cormières en Bretagne en septembre 2011

- À *Montpellier*, la plateforme "ReducPol" est le support de diverses recherches visant à réduire au strict nécessaire la pulvérisation des produits phytosanitaires en fonction de la nécessité de traitement de la plante ou des plantes à protéger ou soigner.
- À *Clermont-Ferrand*, les activités concernent les technologies de la mobilité (pour la sécurité et la qualité du travail des machines), les technologies d'épandage (organiques et minéraux), les technologies pour la perception et la caractérisation de l'environnement, les systèmes d'acquisition et de gestion de l'information.

Autres types de réalisation

L'automatisation plus ou moins totale de différents outils ou éléments de machine se développe rapidement. On peut citer quelques exemples en sylviculture et en viticulture.

En sylviculture, des outils robotisés installés en bout de bras hydrauliques sur des châssis porteurs de genre pelleteuses à chenilles ou à roues (quand le terrain le permet), opèrent, avec de nombreuses capacités d'automatismes les opérations d'élagage, abattage, ébranchage, empilage, et facilitent considérablement les opérations de débardage. Il ne s'agit pas de vrais robots mais d'outillages dont les fonctions ont été plus ou moins complètement automatisées.

En viticulture, les machines à vendanger dites robotisées ne sont, pour l'instant, que des machines de récoltes plus ou moins automatisées similaires, dans leur principe, à d'autres matériels de récolte comme les moissonneuses batteuses.

Cela étant, pour tout ce qui concerne l*a récolte précise des fruits* qui, pour l'instant, réclame beaucoup de main d'œuvre, car il faut la reconnaissance du pied, de la branche ou du sarment, du fruit

ou de la grappe, de nombreuses recherches restent à mener car il faut des systèmes très performants de reconnaissance des formes, de cinématiques de bras, de mécanismes de préhension et de cueillette, etc.

Un robot de taille de la vigne (qui porte le nom de V.I.N.) a également été présenté à l'automne 2012. Il semble que ce prototype demande encore quelques perfectionnements. Une fois au point il pourrait apporter une aide précieuse au vigneron dans une opération qui reste toujours pénible et astreignante.

Toutefois, dans ces différents domaines, l'aspect économique et social ainsi que la capacité d'accueil du marché restent prédominants. Le relatif échec du lancement de robots du type "Magali" incite les industriels à la prudence.

Tendances générales actuelles

La recherche des économies de main d'œuvre cède maintenant la place à la mise au point de matériels visant à économiser au maximum les épandages d'engrais et la pulvérisation de produits phytosanitaires. On commence à étudier parallèlement les moyens d'augmenter la productivité par unité de surface.

Le tracteur totalement automatique et autonome serait parfaitement réalisable avec les technologies actuelles. Il n'est pas certain que, compte tenu de son coût, le marché correspondant intéresse *pour l'instant* les industriels. Il serait toutefois étonnant que ce type de réalisations ne débouche pas dans un avenir proche. La demande des pouvoirs publics et des agriculteurs va plutôt, *actuellement*, vers des dispositifs capables d'apporter à la plante, en eau, engrais et produits phytosanitaires, exactement ce dont elle a besoin dans l'espace et dans le temps.

Dans cet axe de progrès, différents instituts de recherches en Europe du Nord et aux Etats-Unis, cherchent actuellement à développer une forme particulière de minirobotique agricole ou horticole. Des groupes de minirobots se déplaceraient de façon autonomes dans les parcelles avec une précision de position de quelques cm. Ils seraient munis à la fois de capteurs suffisamment sensibles et de microprocesseurs suffisamment puissants pour détecter les besoins unitaires en fertilisants et les éventuels traitements nécessaires sous la forme de microdoses locales d'insecticides ou de fongicides appliqués au sujet végétal visé. D'autres appareils, sur des châssis du même type, pourraient être munis d'outils mécaniques capables de reconnaître et d'extirper les adventices indésirables. Ces groupes pourraient être contrôlés par un véhicule "mère" assurant à la fois leur transport, leur surveillance et leur logistique.

En matière d'*élevage,* les économies de main d'œuvre restent un objectif social et économique fondamental. Les stalles de traite entièrement robotisées avec contrôle des animaux deviennent d'un usage courant. Les étables à nettoyage automatique gérant les déchets deviennent de plus en plus nombreuses. Le contrôle robotisée des troupeaux au pré commence à se développer.

Ces tendances annoncent des besoins de plus en plus importants en capital qui ne peuvent être satisfaits que par un accroissement continu de la taille des exploitations.

En matière de production de lait, les pays d'Europe du Nord ont amorcé cette révolution depuis des années et obtiennent maintenant des productivités élevées et donc des prix de revient très compétitifs. L'élevage français se trouve obligé de suivre cette même voie.

Dans une optique plus générale de développement, on observe que l'agriculture française, perd actuellement des parts de marché à l'international et même en national. Il est clair que notre agriculture doit développer sa productivité et sa compétitivité vis à vis de ses concurrents européens du Nord mieux équipés et de ses voisins du sud à main d'œuvre bon marché et dont les règles de protection environnementale sont nettement moins rigoureuses.

Un recours plus intensif à l'automatisation et à la robotisation, associé au savoir-faire de ses professionnels et au potentiel agroclimatique de ses terroirs devrait permettre de redresser cette situation.

Impressions d'avenir

Il est possible, sinon très probable, qu'à plus long terme les serres entièrement automatisées et les unités de productions d'algues unicellulaires (par exemple de type spiruline) sous atmosphère fortement enrichie en CO_2 et éclairage continu, ainsi que de protéines par des levures deviennent les éléments prépondérants de la production alimentaire mondiale. Divers groupes industriels travaillent actuellement à la conception de bioréacteurs géants, utilisant des micro-organismes de ce type, éventuellement génétiquement améliorés en vue d'en optimiser le rendement. La robotisation de ces unités sera, à coup sûr, un beau sujet d'étude.

Bibliographie sommaire

Les publications sur la robotique en général et la robotique agricole en particulier sont extrêmement nombreuses et d'un intérêt inégal.

Les 2 premiers ouvrages cités sont des traités thématiques récents, très complets, mais particulièrement techniques, et qui ne sont pas d'une lecture toujours aisée.

L'article de *La Jaune Et La Rouge*, est une une très bonne synthèse agréablement abordable par les non spécialistes intéressés.

Le compte rendu de l'Atelier *La place du robot dans l'agroalimentaire* du symposium Qualiméditerranée 2011 donne en quelques pages une bonne idée d'ensemble de la problématique actuelle du thème. Ses liens hypertextes permettent de se référer à l'intégralité des diverses communications.

Le numéro spécial des *Annales des Mines,* particulièrement intéressant, précise, par ses différents articles, l'état de l'art et les grands axes de l'évolution de la robotique :

* BOP Charles , *Traité de Robotique*, Tome 1 Les Architectures (conception-modélisations), Tome 2 Les Parties Opératives (actionneurs, transmissions, capteurs), Tome 3 La partie commande (précision, vibrations, sécurité), Ellipses Technosup, 2010 ;

* LEIDWANGER Yann, *Robots mobiles intelligents, du capteur au comportement*, ETSF, 2006 ;

* *La Jaune Et La Rouge*, mai 2010., n° 655, spécial robotique : **http://www.lajauneetlarouge.com/sites/default/files/magazine/2010/655/pdf-couverture/655-couv-sommaire.pdf ;**

* *La France Agricole* , décembre 2011 – reprise de tous les articles traitant des robots de traite : **http://www.lafranceagricole.fr/Tag/robot+de+traite ;**

* Dossier spécial robot de traite : **http://www.web-agri.fr/dossier-special-118/materiel-de-traite-2009/ ;**

* *La place du robot dans l'agroalimentaire*, présentation synthétique très complète, Les rencontres Qualiméditerranée - Montpellier Supagro-INRA , 17 et 18 novembre 2011 : **http://midipack.org/contenu/uploads/2012/03/CR-Atelier-4_robotique_RQ2011.pdf** ;

* *Annales des mines - Réalités industrielles*, février 2012, les robots : nouveaux concepts, nouveaux usages - Excellent dossier, très documenté, sur les tendances d'avenir de la robotique.

* Site **http://www.humanoides.fr/**. Il s'agit d'un site généraliste de vulgarisation, agréable à consulter mais qui apporte peu dans le détail et les aspects techniques et économiques.

****