

# Optimisation des pulvérisateurs agricoles pour une meilleure répartition au sol : prototypage virtuel

Jean-François Bonicel, Olivier Naud et Philippe Roux

**D**e nombreuses études ont mis en évidence que la répartition au sol des produits phytosanitaires était très largement tributaire des mouvements de la rampe de pulvérisation. Des recherches ont été conduites au Cemagref sur ce thème et ont débouché sur un modèle de répartition au sol en fonction d'essais de répartition statique d'une buse pour différentes hauteurs, de la vitesse d'avancement du pulvérisateur et de la position de la buse (angulaire et cartésienne) par rapport au sol (Lardoux, 2002 ; Sinfort *et al.*, 1996). Dans ce contexte, les constructeurs ont toujours recherché à améliorer à la fois le système de suspension des rampes, le rapport poids/rigidité de la rampe elle-même, et plus récemment, ont inclus des systèmes d'amortissement au niveau de l'essieu du pulvérisateur sur les appareils traînés.

Dans le cadre d'un objectif général de réduction des intrants et d'optimisation de l'application des produits phytosanitaires, et afin de pouvoir répondre aux besoins de recherche et d'innovation de nos partenaires, notre unité<sup>1</sup> a développé des compétences et un savoir-faire autour d'outils logiciels en matière de simulation et de CAO<sup>2</sup>. Le concept de CAO tend à l'heure actuelle à dépasser le simple dessin industriel, fut-il en trois dimensions, pour recouvrir une acception plus complète que nous définirons ainsi : « Ensemble homogène de logiciels permettant non seulement de représenter et de concevoir des équipements, mais aussi de simuler leur comportement cinématique et/ou dynamique et de calculer leur structure et leur résistance mécanique (calcul de structure) ».

Dans cet article, nous présenterons tout d'abord de façon générale les différents outils et concepts mis en œuvre dans le « prototypage virtuel ». Nous montrerons leur intégration dans une démarche méthodologique de conception ainsi que la synergie avec les essais, par exemple sur simulateur de piste. Enfin, pour le cas des pulvérisateurs agricoles, nous montrerons comment la combinaison d'un modèle « machine virtuelle » avec un modèle de répartition au sol d'une buse pourrait permettre une caractérisation globale d'un système de pulvérisation.

## Les simulations dynamiques : vers le concept de prototypage virtuel

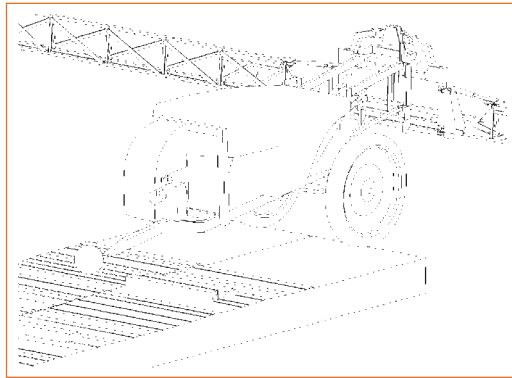
Les outils CAO de simulation « cinématique et dynamiques » (tel que Adams®, Dads® ou LMS Virtual.Lab®, Solid-dynamics®, etc.) permettent de simuler sur ordinateur le fonctionnement d'un concept d'équipement avant toute réalisation de prototypes. Ils permettent, par exemple, de simuler le roulage d'une machine, le franchissement d'obstacles, le fonctionnement d'un mécanisme complexe tels que les systèmes de suspension de rampes combinant des cinématiques à biellettes avec des éléments d'amortissement et de raideur. Par exemple, avec ce type de logiciel, on peut simuler le couplage et les interactions d'un système de suspension du châssis d'un pulvérisateur avec la suspension de rampe, et ainsi optimiser les différents paramètres d'amortissement afin d'obtenir le meilleur compromis pour les différentes situations auxquelles l'équipement va être soumis.

1. L'unité mixte de recherche Information et technologies pour les agro-procédés (UMR ITAP) regroupe les laboratoires Cemagref (unité de recherche TEAP), la Chaire du génie des équipements de l'Agro-Montpellier (ENSA Montpellier), et le Cirad AMIS.
2. CAO : conception assistée par ordinateur.

### Les contacts

Cemagref, UR Technologie et équipements des agro-procédés, 361 rue J.-F. Breton, BP 5095, 34033 Montpellier Cedex 1

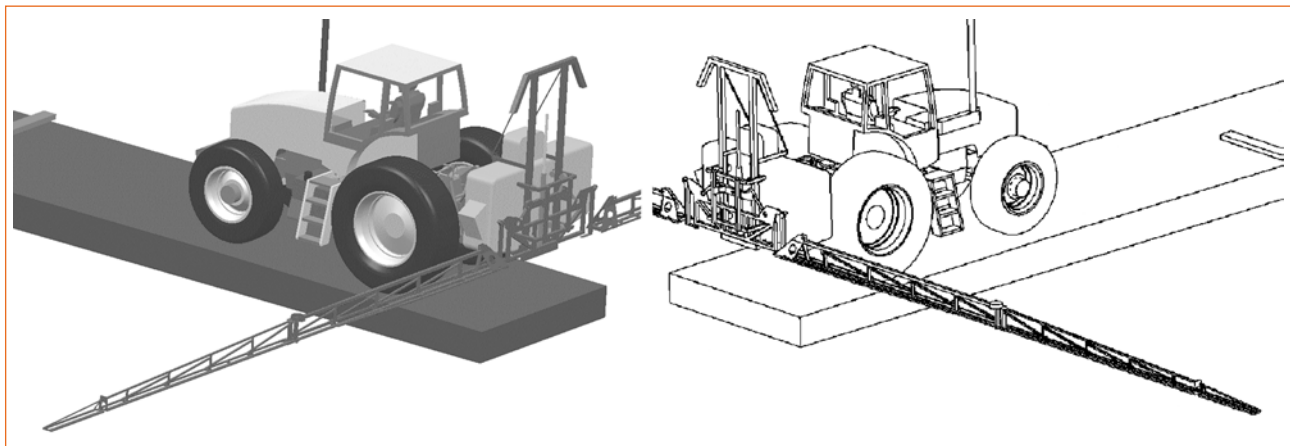
► Figure 1 – Modélisation d'un appareil traîné (collaboration TECNOMA) passant virtuellement sur la piste du Cemagref à Antony.



Ainsi, il devient possible de tester virtuellement un grand nombre de combinaisons de paramètres (longueur de biellettes, amortissements, types de pneus, différentes pistes pour différents remplissages de la cuve, etc.). Le nombre de combinaisons testées peut dans ce cas devenir rapidement très important et donc extrêmement coûteux si l'on devait réaliser des essais réels avec des prototypes même en mettant en œuvre les techniques de plans d'expériences. Les figures 1 et 2 présentent des exemples de modèles de prototypage virtuel de différents appareils de traitement traînés et portés.

Ces simulations permettent d'autre part d'évaluer les sollicitations (efforts, vitesses et/ou accélérations) mises en jeux pour différentes configurations de fonctionnement. Celles-ci sont alors utilisées pour le calcul de structure et le dimensionnement des composants mécaniques du pulvérisateur. Un exemple de résultat de simulation est présenté en figure 3. Il s'agit de l'effort vertical dans le pneu droit d'un tracteur équipé d'un pulvérisateur porté lors du franchissement

▼ Figure 2 – Modélisation d'un appareil porté (collaboration TECNOMA) passant une marche sur la roue droite.



d'un obstacle (marche dite « Specs », Sinfort et al., 1997). Lorsque la simulation est lancée, à l'instant  $t = 0$  s, la gravité est appliquée à l'appareil, ce qui génère les premières oscillations correspondant à la stabilisation des pneus sur le sol. Au bout d'environ 4 s une consigne « virtuelle » d'avancement de l'appareil est donnée, générant elle aussi des oscillations liées à l'accélération du système. Enfin, lorsque la vitesse d'avancement est stabilisée, le franchissement virtuel de l'obstacle a lieu. On peut constater sur la figure 3 que l'effort statique vertical dans le pneu droit était d'environ 25 kN (soit 2,5 t) et qu'il est plus que doublé lors du franchissement de l'obstacle. Le moment où cet effort s'annule correspond au décollage temporaire de la roue par rapport au sol : le modèle de pneu gère les contacts.

### Les simulations des équipements électro-hydrauliques et des automatismes

Modéliser le fonctionnement mécanique d'un équipement constitue une étape nécessaire mais pas toujours suffisante. En effet, l'équipement comprend également des actionneurs hydrauliques ou électriques et un ensemble de commandes électroniques. Matlab® Simulink® est un programme parmi d'autres permettant la simulation des systèmes par blocs de signaux, en temps continu ou en temps discret. Sur la base de cet outil logiciel, nous avons développé un savoir-faire et une bibliothèque de composants permettant de simuler le comportement de systèmes hydrauliques (ou électriques) et leur couplage avec les phénomènes mécaniques (figure 4). Il devient alors possible, non seulement de dimen-

sionner les différents composants d'un circuit hydraulique, mais aussi par exemple de simuler les « coups de béliers » qui vont s'y produire et les mouvements potentiels qu'ils peuvent générer dans le mécanisme. Reste alors à optimiser les stratégies de contrôle commande embarqué (asservissements) qui peuvent aussi être simulées virtuellement, et ceci avant la réalisation physique du premier prototype.

Ce type d'outil de simulation est assimilable à une **plateforme d'intégration de modèles** entre les mécaniciens et les électroniciens qui peuvent ainsi, au travers d'un outil commun aux deux métiers, concevoir et optimiser des équipements. L'intégration « Mécatronique » (Bolton W., 1998) s'en trouve renforcée au bénéfice du produit final.

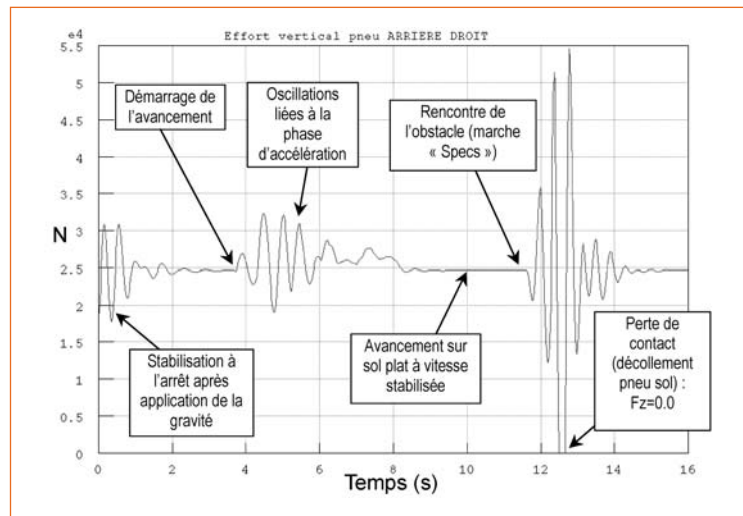
### Les calculs de structures

Lorsque l'avant-projet du pulvérisateur donne des résultats satisfaisants sur le plan du comportement cinématique et dynamique, la vérification structurelle de la résistance mécanique des différents composants est indispensable. Un outil de calcul de structure est alors utilisé afin de visualiser des cartes de contraintes, des déformées, des modes de flambement ou de fréquences propres de vibrations.

Avant de réaliser ces calculs, il convient généralement de définir un cahier des charges précis pour le dimensionnement de la rampe de pulvérisation, ce qui est une tâche délicate. En effet, le comportement global d'un pulvérisateur, et donc les sollicitations que subit la rampe, dépendent à la fois de la rigidité de celle-ci, de son système de suspension, et éventuellement du dispositif de suspension du pulvérisateur lui-même. Dans ce contexte, le calcul de structure de la rampe pose deux problèmes principaux :

– la définition des sollicitations à utiliser (niveau d'accélération, efforts...). Les données liées aux sollicitations peuvent provenir soit de mesures expérimentales, soit de simulations dynamiques (CAO). Ces sollicitations à appliquer à la rampe dépendent largement du système de suspension (filtration des sollicitations aux pneus) ;

– la définition des critères de vérification (en particulier, déformations maximales et réponses en fréquences acceptables). En l'absence de critères définis, une méthode consiste à calculer au préalable une rampe comparable existante et

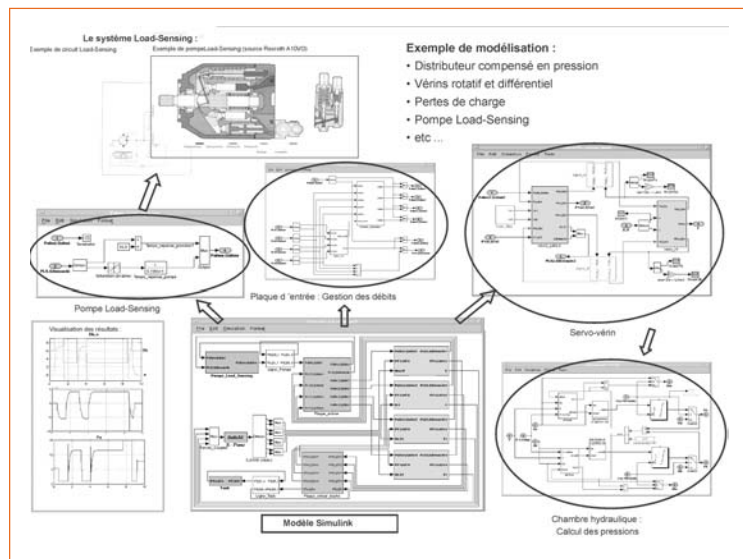


▲ Figure 3 – Exemple de résultat de simulation dynamique : effort vertical dans une roue franchissant un obstacle (rampe de 24 mètres à 16 km/h).

à se fixer les résultats obtenus comme base de comparaison avec la nouvelle rampe.

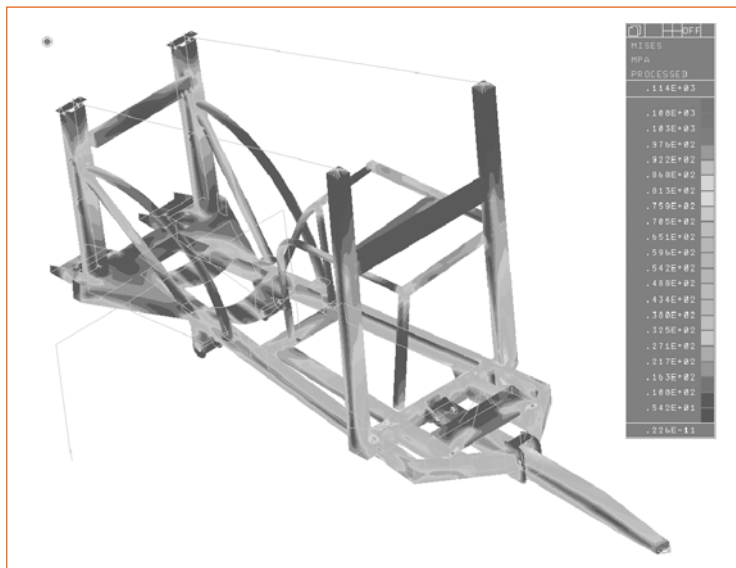
Les logiciels de calcul de structure utilisés mettent en œuvre la méthode des éléments finis. La structure dont on veut étudier le comportement doit être préalablement modélisée. Cette modélisation consiste à décrire la nature géométrique et physique (inerties des profilés, épaisseurs des tôles, caractéristiques des matériaux...) de cette structure ainsi que les actions (liaisons, sollicitations) qui lui sont appliquées (figures 5, 6 et 7). Pour ce

▼ Figure 4 – Exemple de modélisation d'un circuit hydraulique avec Matlab® Simulink®.





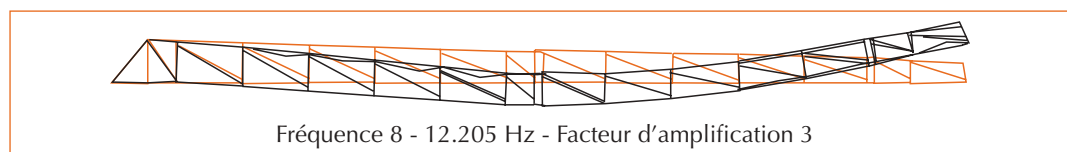
▲ Figure 5 – Calcul de structure d'un tronçon de rampe (collaboration TECNOMA).



▲ Figure 6 – Calcul de structure d'un appareil traîné (collaboration TECNOMA).

faire, le problème est discrétisé (maillage de la structure). La précision du calcul est fonction de la qualité et de la finesse du maillage. La validité des résultats obtenus dépend aussi très largement de la justesse de la modélisation, des différentes configurations d'utilisation envisagées (« cas de chargement »), et de leur degré de simplification par rapport à la réalité du système étudié.

► Figure 7 – Fréquence propre d'une rampe sous sollicitations (poids propre) – Collaboration TECNOMA.



L'analyse des résultats est double, elle consiste à vérifier les déplacements (dus aux déformations des matériaux) d'une part, et les niveaux de contraintes mécaniques de l'autre.

Pour ce qui concerne les sollicitations, celles-ci peuvent être classées en 3 grandes familles :

– ELS (états limites de service). Sollicitations rencontrées fréquemment lors du service de l'appareil pouvant générer des phénomènes de fatigue. La vérification des niveaux de contraintes doit être faite avec des méthodes et/ou des facteurs de sécurité prenant en compte ces phénomènes de fatigues (fatigues des matériaux, fatigues des assemblages soudés, etc.) ;

– ELU (états limites ultimes). Sollicitations ultimes que l'appareil rencontrera exceptionnellement durant sa vie. La vérification des niveaux de contrainte admissibles peut se faire jusqu'à la limite d'élasticité voire la limite ultime de résistance (plasticité) ;

– cas de chargements « forfaitaires ». Ceux-ci ne correspondent pas nécessairement à des cas totalement réalistes, mais ils ont la caractéristique d'être facilement réalisables lors d'essais de chargement simples. L'objet de ces cas de chargement est essentiellement de comparer des niveaux de déformation entre une solution existante que l'on peut tester (physiquement ou virtuellement) et des propositions d'optimisation.

### Des outils, une expertise et des méthodologies pour une meilleure stabilité des rampes

Les connaissances nécessaires à une conception répondant au mieux aux besoins des utilisateurs finaux ne sauraient se limiter à la maîtrise d'outils de simulation et de calcul. Un niveau d'expertise est indispensable à la conduite de telles études. Celui-ci doit reposer sur une connaissance et une analyse des fonctions des machines agricoles, des contraintes exercées par le milieu et des configurations de travail les plus critiques que la machine va être amenée à rencontrer durant son utilisation. Cette expertise, associée à des méthodes

de conception telles que l'analyse fonctionnelle et l'analyse de la valeur, permet d'améliorer les performances des systèmes de pulvérisation en terme de stabilité des rampes et de résistance mécanique. En particulier, une méthode de conception intégrée adaptée à la problématique des équipements agricoles et agroalimentaires a été développée au sein de l'unité mixte de recherche (ITAP) par l'équipe du CIRAD-Amis (méthode CESAM : Giroux *et al.*, 1999 ; Marouzet *et al.*, 1998, 1999). Les retombées pour l'utilisateur sont une meilleure répartition des produits sur la culture et une fiabilité accrue des structures et des mécanismes.

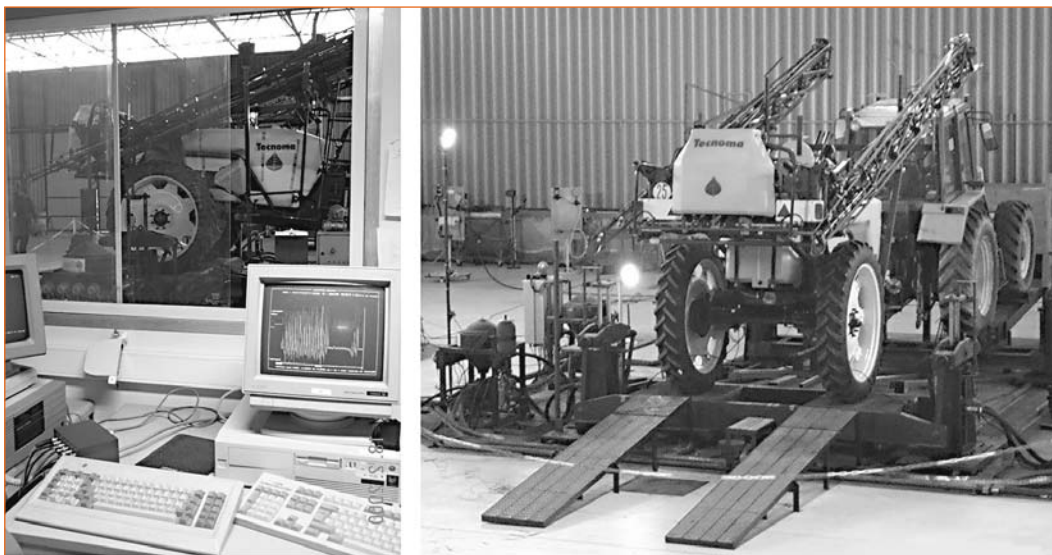
### Synergie entre « prototypage virtuel » et simulateur de pistes

La démarche de prototypage virtuel qui vient d'être présentée permet de réduire considérablement la durée de conception et de mise au point des prototypes. Il n'en reste pas moins nécessaire au final de tester les équipements lors de la mise au point d'un prototype préindustriel. Ce type d'essai permet entre autres de caler le modèle virtuel, sachant que la majorité des différences observées est bien souvent due à des jeux mécaniques présents sur les machines et pas toujours modélisés en détail dans le prototype virtuel. Certains paramètres utilisés lors des simulations seront ajustés si nécessaire. À titre d'exemple, les données disponibles concernant les pneumatiques agricoles sont dans la plupart des cas très limitées (on ne dispose souvent que

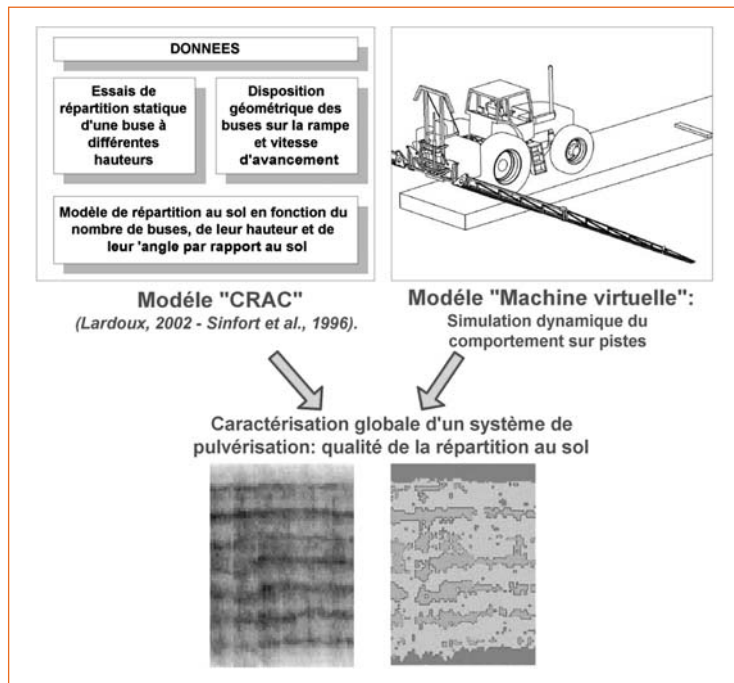
de la raideur verticale des pneus) et la vérification expérimentale de l'amortissement du pneumatique ou sa raideur transversale est ici possible. Le Cemagref met donc à la disposition de ses partenaires un banc de vibration « simulateur de pistes » (figure 8) unique en son genre (pour une présentation détaillée, voir Denoirjean, 1999). L'équipement à tester est installé sur des semelles qui reproduisent des marches ou des pistes, permettant de mesurer des niveaux d'accélération ou des déplacements en extrémité de rampes. La synergie est manifeste entre les outils logiciels de simulation et ce banc expérimental.

### Conclusion, perspectives

La démarche de « prototypage virtuel », largement utilisée dans l'automobile et l'aéronautique, est en train de se développer chez les concepteurs d'agroéquipements. Ce concept va permettre dans les prochaines années de réduire de façon significative la durée et le coût de conception et de mise au point des équipements. Par rapport à une démarche expérimentale passant par deux ou trois prototypes, le gain réalisé en aval sur la mise au point et l'optimisation peut être investi en amont pour obtenir des données à utiliser dans les modèles (par exemple caractéristiques de pneus, efforts et énergies mis en jeux pour la coupe ou la récolte de tel ou tel produit, profils de terrains agricoles ou forestiers, modélisation de tel ou tel mécanisme, etc.). L'avantage de la démarche est que cet investissement amont est une connaissance capitalisable qui peut être uti-



◀ Figure 8 – Banc simulateur de piste du Cemagref.



▲ Figure 9 – Interfaçage du modèle de répartition au sol avec une maquette virtuelle.

lisée et valorisée dans des études ultérieures. On remarquera que la réalisation de modèles de plus en plus complexes est possible dans la mesure où l'on dispose de données ou de moyens expérimentaux correspondant à chacune des étapes du processus de modélisation. L'apport en sciences expérimentales et en expertise d'équipes de recherche comme la nôtre est alors essentiel afin de fournir ces données de base aux concepteurs des équipementiers qui seront amenés à utiliser ces outils de prototypage virtuels dans les années à venir.

Pour le cas plus précis des pulvérisateurs agricoles, il devient envisageable de compléter la démarche de « prototypage virtuel » en interfaçant au modèle décrit plus haut un modèle de répartition au sol. Ce modèle de répartition au sol est réalisé à partir d'essais de répartition statique d'une buse pour différentes hauteurs, et de calculs liés à la vitesse d'avancement du pulvérisateur et aux positions des buses (Lardoux, 2002 ; Sinfort et al., 1996). Cette démarche (figure 9) permettrait de caractériser un système complet de pulvérisation par rapport à un critère objectif de répartition sur la culture, c'est-à-dire de rapprocher la conception de ses objectifs fonctionnels. L'influence des paramètres « climatiques » (en particulier le vent) sur la caractérisation de la qualité de la répartition au sol telle que présentée dans la figure 9 pourrait faire l'objet d'une étape « ultime » de la démarche.

L'intérêt de la démarche de prototypage virtuel et de l'intégration mécatronique dès le démarrage de la conception a été mis en évidence en particulier pour les pulvérisateurs grande culture. Le problème des pulvérisateurs arboricoles et viticoles est quant à lui plus complexe puisqu'il intègre forcément de l'aérodynamique (assistance par flux d'air, fragmentation pneumatique, etc.). Pour la conception globale des appareils, les perspectives d'amélioration de la qualité de la pulvérisation vont passer dans les années à venir par l'intégration « mécatronique-aérodynamique ». Cette intégration constitue une étape similaire à celle qui a, ces dernières décades, amené à la définition d'un nouveau champ des sciences de la conception et de l'ingénieur, la « mécatronique » (Bradley *et al.*, 1991). Les perspectives scientifiques ouvertes par ce type de démarche sont donc très riches tant pour les équipes de recherches que pour les retombées attendues par les industriels et les utilisateurs finaux. □

### Résumé

La qualité de la répartition sur les cultures d'un traitement phytosanitaire est largement tributaire de la stabilité des rampes de pulvérisation. La maturité des systèmes de conception assistés par ordinateurs permettent aujourd'hui d'aborder ce problème à travers le prototypage virtuel. Celui-ci permet en effet de simuler le comportement dynamique d'un système de pulvérisation, (y compris les aspects hydrauliques de contrôle et de commande), afin de pouvoir l'optimiser avant de passer au stade pré-industriel.

### Abstract

The quality of the distribution on the crops of a plant health treatment is largely dependent on the stability of the spray booms. The maturity of the computer aided design systems make it possible today to tackle this problem through virtual prototyping. This indeed makes it possible to simulate the dynamic behaviour of a spraying system (including hydraulics and control aspects) in order to be able to optimise it, before reaching the pre-industrial stage.

### Bibliographie

- DENOIRJEAN, J., DEBROIZE, D., 1999, La stabilité des rampes mise à l'épreuve, *Perspectives Agricoles*, n° 242, p 59
- LARDOUX, Y., 2002, *Étude de la répartition au sol des produits phytosanitaires sous une rampe en mouvement à partir d'une modélisation dynamique – Application à la définition de méthodes d'évaluation des pulvérisateurs à jets projetés*, thèse de l'école supérieure d'agronomie de Montpellier soutenue le 22 juin 2002.
- ROUX, P.; NAUD, O.; BONICELLI, B.; BONICEL, J.-F., 1998, *CAD in agricultural equipment design*, CIGR February 98, XIII<sup>th</sup> International Congress on agricultural engineering (Rabat Maroco).
- SINFORT, C. ; HERBST, A., 1996, Évaluation de la qualité de la pulvérisation pour des pulvérisateurs grande culture, *Bulletin OEPP*, vol. 26, n° 1, p. 27-36.
- SINFORT, C. ; LARDOUX, Y. ; MIRALLES, A. ; ENFALT, P. ; ALNESS, K. ; ANDERSON, S., 1997, Comparison between measurements and predictions of spray pattern from a moving boom sprayer, *Aspects of applied biology*, 48, 1997, p. 1-8.
- BRADLEY, D.-A.; DAWSON, D.; BURD, N.-C.; LOADER, A.-J., 1991, *Mechatronics: Electronics in products and processes*, Chapman and Hall.
- BOLTON, W., 1998, *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering*, Prentice Hall, 390 p.
- MAROUZE, C. ; GIROUX, F., 1998, *Méthode CESAM : conception d'équipements dans les pays du Sud pour l'agriculture et l'agroalimentaire. Méthode. Évolution du premier modèle, modèle 1.2*, Montpellier, CIRAD-SAR, ATP Méthode de conception d'équipements.
- GIROUX, F. ; GUEYE, M. ; MAROUZE, C., 1999, *Conception intégrée au service de l'innovation produit dans les pays en développement*, 3<sup>e</sup> Congrès international de Génie industriel, Montréal, Canada.
- MAROUZE, C., 1999, *Proposition d'une méthode pour piloter la trajectoire technologique des équipements dans les pays du Sud. Application au secteur agricole et agroalimentaire*, thèse de doctorat, département Génie industriel, ENS d'Arts et Métiers, Paris, France.