

# CAO en conception d'équipements agricoles : vers le concept de machine virtuelle

P. Roux, O. Naud, J.F. Bonicel, M. Rombaut, J.M. Fatou

L'industrie du machinisme agricole (première industrie mécanique en France après l'automobile) a réalisé, comme l'ensemble de l'industrie mécanique, une importante évolution technologique. La plupart des bureaux d'études des constructeurs d'équipements agricoles ont évolué de la planche à dessin vers des outils de conception assistée par ordinateur (CAO) ou de dessin assisté par ordinateur (DAO). La distinction entre ces deux outils informatiques a longtemps été basée sur leur capacité à dessiner en «volumique» dans l'espace pour la CAO ou dans le plan (voir en 3D filaire ou surfacique) pour la DAO (*Encadré 1*). Le concept de CAO tend à l'heure actuelle à dépasser le simple dessin, fut-il en 3 dimensions, pour recouvrir une acception plus complète de la conception : la CAO tend à devenir un ensemble homogène de logiciels permettant non seulement de représenter et de concevoir des équipements dans l'espace, mais aussi de simuler leur comportement (cinématique et/ou dynamique) et de calculer leur résistance mécanique (calcul de structure).

L'évolution de ces outils les rends désormais particulièrement aptes à être utilisés pour la conception d'équipements agricoles soumis naturellement à des contraintes sévères et variées. Afin de pouvoir répondre aux besoins les plus pointus de ses partenaires industriels ou des

Encadré 1

## DAO, CAO, FAO, CFAO

Le dessin assisté par ordinateur (DAO) est un outil qui remplace la planche à dessin, mais sans vraiment révolutionner la manière de concevoir des plans. La CAO, permet de modéliser dans l'espace aussi bien des surfaces complexes (courbes de Bézier, splines, Bsplines, etc.) que des volumes. De même, des intersections, des projections, des coupes entre objets géométriques peuvent aisément être réalisés. Parallèlement à la CAO, la fabrication assistée par ordinateur (FAO) a connu un développement très important (machines outils à commandes numériques). Grâce à la CFAO (Conception et Fabrication assistée par ordinateur) le programme d'usinage d'une pièce est réalisée directement à partir du modèle CAO 3D. Dans ce contexte, il est permis d'imaginer à l'avenir des usines «sans plans de fabrication».

différentes filières agricoles, l'unité de recherche Génie des équipements agricoles et forestiers du Cemagref a donc développé des compétences et un savoir-faire autour d'outils logiciels du commerce en matière de simulation et de CAO (*Encadré 4*). L'article présente ces méthodes à travers différentes applications.

## Des outils associés à une démarche de conception

Le concept de Conception Assistée par Ordinateur peut donc aujourd'hui se résumer à un ensemble cohérent d'outils de :

**Philippe Roux,  
Olivier Naud,  
Jean François  
Bonicel, Marc  
Rombaut, Jean-  
Michel Fatou,**  
Cemagref, «Génie  
des équipements  
agricoles et  
forestiers»,  
Laboratoire  
«Mecatronique»  
BP 5095  
34033 Montpellier  
Cedex 1

-Modélisation géométrique (volumique et surfacique 3D), dessins techniques, liasses de plans ...

-Simulations cinématique et/ou dynamique du comportement d'un équipement ainsi que simulation des équipements électro-hydrauliques et des asservissements.

-Calcul de structure des différents composants de l'équipement (vérification de la résistance et du niveau de déformations)

### ■ *Modélisation géométrique*

La conception mécanique, géométrique et cinématique, est assurée grâce à un logiciel de CAO 3D. Celui ci permet de modéliser dans l'espace des solides complexes, de vérifier les interférences possibles, d'évaluer des poids, des inerties, et de produire après étude une liasse de plans cotée à partir du modèle 3D. La *Figure 1* présente l'exemple de la conception d'une tête de bûcheronnage. Un tel outil, situé au bout d'une grue forestière combine les opérations d'abattage, d'ébranchage et de billonnage. les différents logiciels utilisés sont indiqués dans l'*encadré 4*.

### ■ *Simulations dynamiques*

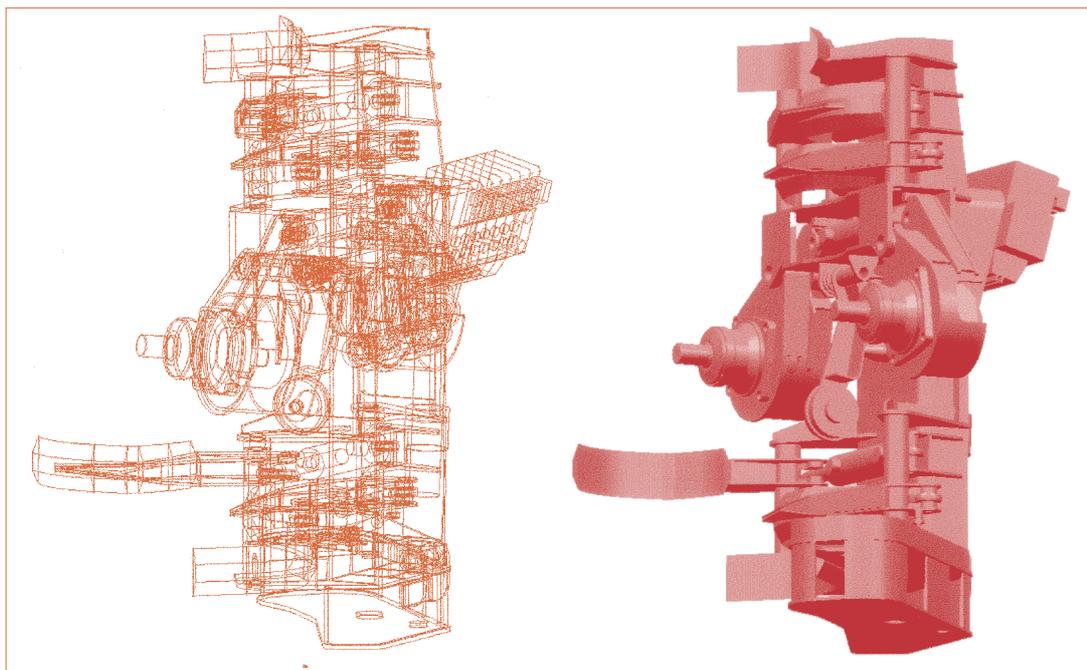
L'outil CAO «cinématique et dynamique» permet de simuler le fonctionnement d'un équipement sur l'ordinateur, par exemple roulage d'une machine, franchissement d'obstacle, fonctionnement d'un mécanisme complexe avec des batteurs, etc. Ces simulations permettent essentiellement deux choses :

-l'évaluation du comportement de l'équipement avant tout prototypage (par exemple efficacité de la cinématique, amplitudes des mouvements d'un mécanisme, stabilité dans les pentes d'un engin, etc...);

-l'évaluation des efforts, des vitesses ou des accélérations mises en jeux pour différentes configurations de fonctionnement.

L'efficacité en conception et la qualité méthodologique des études se trouvent améliorées par les liens entre le logiciel de conception des solides et l'outil de simulation. La simulation peut alors intervenir aux différentes étapes de conception, de l'avant-projet et de la conception détaillée.

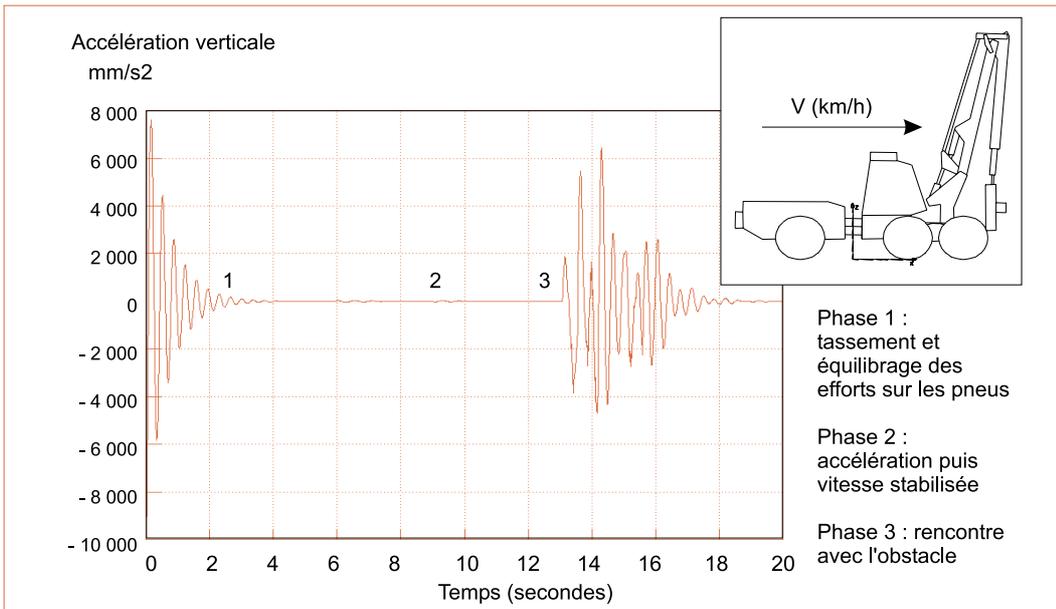
Les logiciels de simulation mécanique offrent



◀ Figure 1 : Représentation CAO (filaire à gauche et volumique à droite) d'une tête de bûcheronnage forestier (Collaboration Cemagref, AFOCEL, EQUIP'FORET)

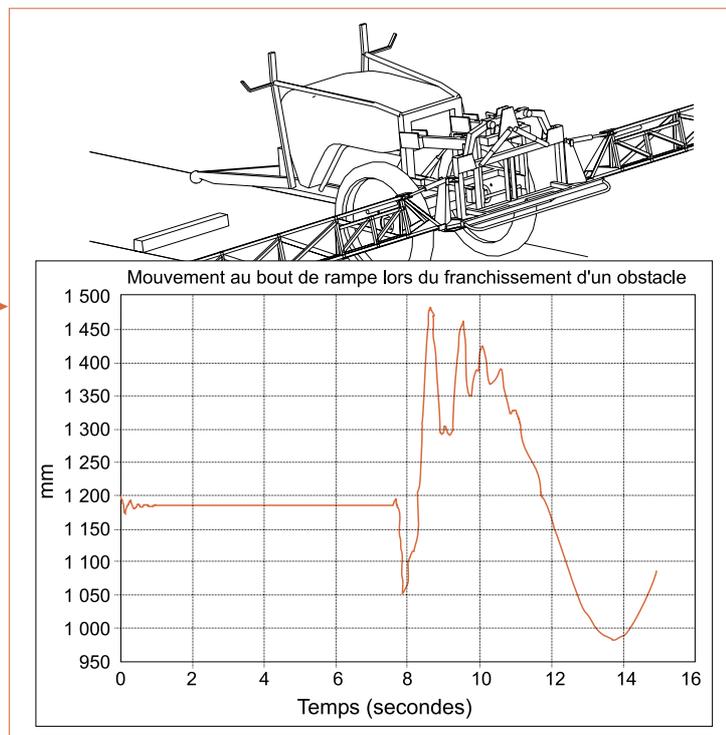
une bibliothèque d'éléments tels que des pneumatiques, des amortisseurs, des ressorts, des éléments de contacts entre solides, etc. Une fois la cinématique décrite dans le modèle, des lois de commandes peuvent être définies pour

chaque actionneur (rampes d'accélération, vitesses de rotations ou de translations, etc.). Les Figures 2 et 3 présentent des exemples de simulation (franchissement d'un obstacle par une machine).



◀ Figure 2 : Exemple de simulation dynamique

▶ Figure 3 : Modèle de simulation de la suspension d'un pulvérisateur (collaboration TECNOMA-Cemagref)



Encadré 2

### Interfaçage des «sous-modèles» sur Simulink®

Les «S-fonction» Simulink® permettent d'interfacer un «sous-modèle» (par exemple le modèle mécanique) au modèle général. Cette S-fonction est appelée à chaque pas de temps par le solveur. Au sein de ce bloc «boîte noire» est calculé l'évolution de l'état interne de cette portion de modèle en fonction de ses entrées. La S-fonction peut contenir à la fois des états continus et des états discrets.

Le solveur (logiciel de résolution des intégrales numériques, à pas de temps variable et optimisé) de Simulink pilote donc également le modèle mécanique. Il reçoit de la S-fonction les sorties qui sont ensuite propagées dans le reste du modèle. Il suffit à l'utilisateur d'insérer cette fonction «modèle mécanique» dans l'environnement Simulink pour réaliser le calcul du modèle complet de la machine virtuelle.

Encadré 3

### Calcul de structure

La méthode des éléments finis est celle qui est principalement utilisée aujourd'hui par les mécaniciens alors que les «différences finis, volumes finis, etc.» sont plutôt utilisés en calculs fluidiques. Les méthodes dites «P» (comme Polynomiales) sont émergentes, et leur utilisation ne cesse de croître. Contrairement aux éléments finis dont le principe est de résoudre un très grand nombre de fois des équations assez simples (d'où une discrétisation appelez maillage qui doit être fine) ; les méthodes «P» se proposent de résoudre des équations pouvant aller jusqu'à un degré élevé (par exemple 12<sup>ème</sup> degré, sur un maillage beaucoup plus «gros-sier»). L'intérêt est alors de réduire considérablement la phase de maillage qui est la phase nécessitant le plus de temps humain ainsi que de permettre une optimisation des formes de pièces semi automatique. Le logiciel est en effet capable de modifier les frontières des éléments puisque ceux ci sont grands en taille et de degré élevé.

Quelle que soit la méthode, les principales étapes du calcul de structure (qui ne sont pas forcément réalisées avec le même logiciel) peuvent se résumer comme suit :

- «Pré-processeur» : La première étape consiste à entrer les données du problème (matériaux, conditions aux limites, liaisons, etc.) ainsi qu'à réaliser le maillage de la structure (maillages filaires, surfaciques ou volumiques).
- «Solveur» : c'est le cœur du programme qui en appliquant une méthode (élément finis, «P», etc.) résout le système d'équation. C'est l'étape qui nécessite le plus de ressources informatiques et le moins de ressources humaines. Le «solveur» est plus ou moins puissant et performant, ses fonctionnalités comprennent en général au minimum le calcul linéaire, le flambement Eulerien et la dynamique au sens vibratoire. Les logiciels les plus sophistiqués permettent d'aborder le non-linéaire tels que par exemple les grands déplacements, les éléments tels que les câbles, les non-linéarités matérielles (plasticité, élastoplasticité, viscoplasticité, etc.) ...
- «Post-processeur» : Cette étape a pour but de visualiser les résultats de calculs à travers des courbes, des cartes de contraintes en couleurs, des visualisation de déformés, etc.

Encadré 4

### Les logiciels utilisés par l'unité de recherche de Montpellier

CATIA®	DADS®	Simulink®	Abaqus®
<ul style="list-style-type: none"> <li>• CAO 3D solide, surfacique, topologique et paramétrique, mise en plan, cotation, etc.</li> <li>• cinématique</li> <li>• calcul de structure linéaire, flambement dynamique vibratoire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• simulation cinématique et dynamique des solides</li> <li>• modules simples pour hydraulique et contrôle</li> <li>• possibilité d'avoir des corps flexibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• description signaux électroniques</li> <li>• algorithmes commande</li> <li>• hydraulique (bibliothèque Cemagref)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• calculs de structures éléments finis non linéaire:</li> <li>• non linéarités géométriques (grands déplacements)</li> <li>• non linéarités matérielles (matériaux, etc...) ou autres</li> </ul>

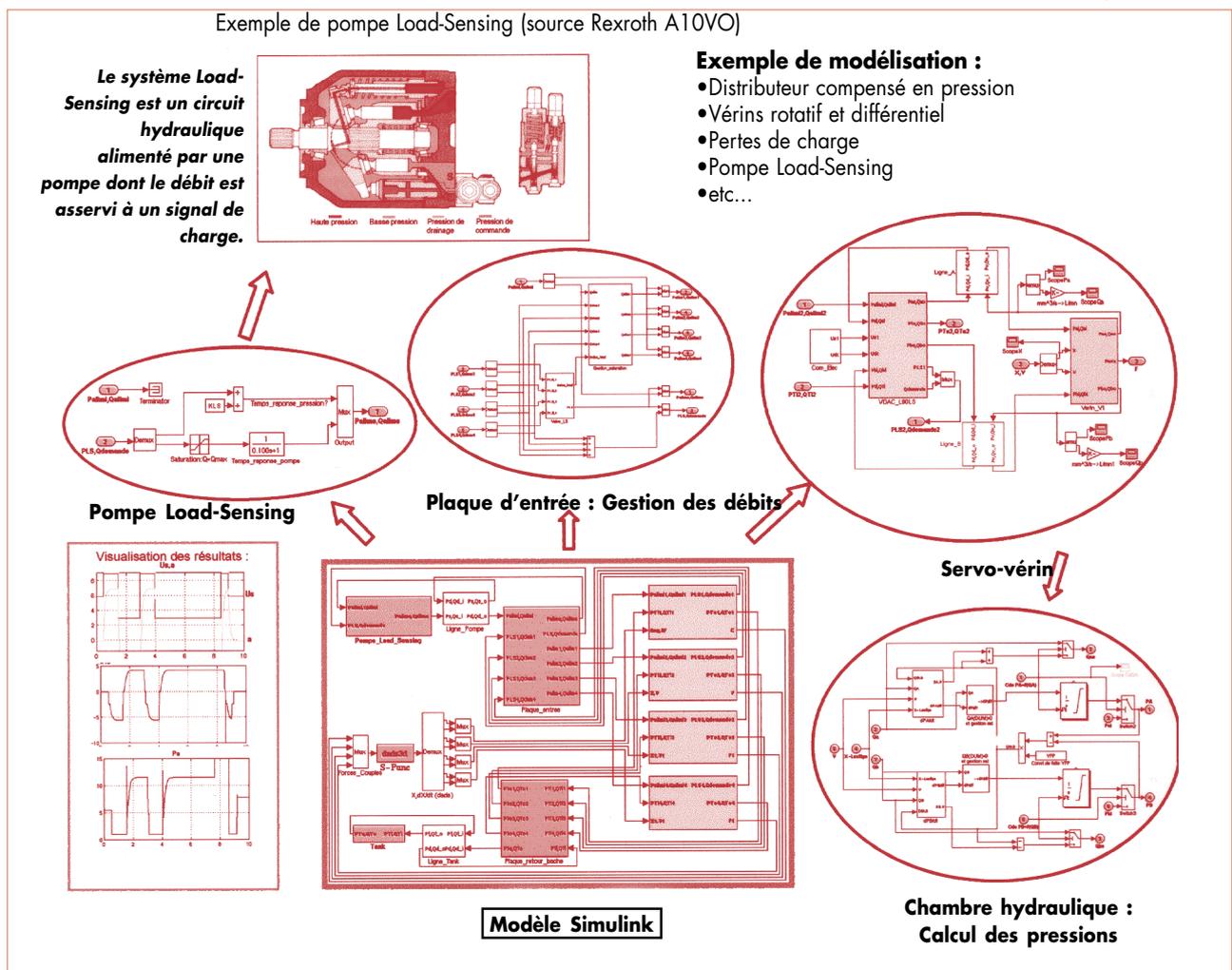
**Simulations électro-hydrauliques et automatismes**

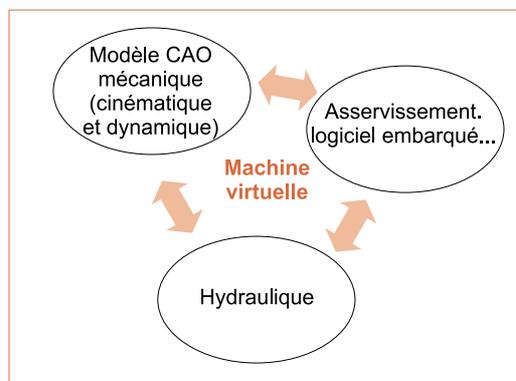
Modéliser le fonctionnement mécanique d'un équipement est une première étape, mais celui-ci est souvent associé à des actionneurs hydrauliques ou électriques et à un ensemble de commande électronique. La simulation de ces automatismes est possible avec des logiciels spécialisés ou en utilisant des progiciels généraux de simulation. Ces progiciels généraux permettent une représentation symbolique des phénomènes physiques mis en jeux, sous forme déclarative ou graphique. Les

éléments de modèle peuvent être regroupés selon une arborescence (déclarative ou graphique) au choix de l'utilisateur. Ceci facilite la réutilisation de modèles anciens, et la réalisation de véritables bibliothèques de simulation, reprenant les caractéristiques des composants utilisés dans les automatismes.

La Figure 4 présente à titre d'exemple la modélisation d'un circuit hydraulique complexe dans l'environnement graphique Matlab® Simulink® où chaque composant est symbolisé avec ses entrées et sorties (débits, pressions, etc.) avec différents niveaux de détails (structure arborescente).

Figure 4 : Exemple de modèle de simulation d'un circuit hydraulique





▲ Figure 5: concept de « machine virtuelle »

Le modèle comprend différents composants, ayant chacun leur propre arborescence détaillée. 4 servo-vérins comprennent chacun un distributeur, une électronique de commande, et un vérin. Les pressions dans les vérins, débits dans les distributeurs, variation du débit de la pompe à cylindrée variable sont calculés.

De la même manière, l'aspect asservissement-contrôle-commande peut être représenté et modélisé à l'aide d'un progiciel général tel que Simulink. La mise en commun du modèle «mécanique», hydraulique et asservissement permet de déboucher sur le concept de machine virtuelle ( Figure 5).

Si l'ensemble des composants n'a pas été modélisé sur le même outil, ce qui sera le plus souvent le cas pour le modèle mécanique, un mécanisme d'interfaçage de «sous-modèles» (comme la «S-fonction» sur Simulink présentée en Encadré 2), sera mis en œuvre. Ainsi, le progiciel général devient une plate-forme d'intégration de modèles, jetant de véritables ponts entre métiers (mécanicien, hydraulicien, automaticien, électronicien...)

En pratique, le modèle «mécanique», réalisé en CAO communique avec le modèle «général» en échangeant des données physiques qui sont :

- en sortie du modèle mécanique : des mesures de déplacements, de vitesses ou d'accélération comme si on avait physiquement des capteurs ;
- en entrée de modèle mécanique : des forces ou des couples.

### ■ Calculs de structures

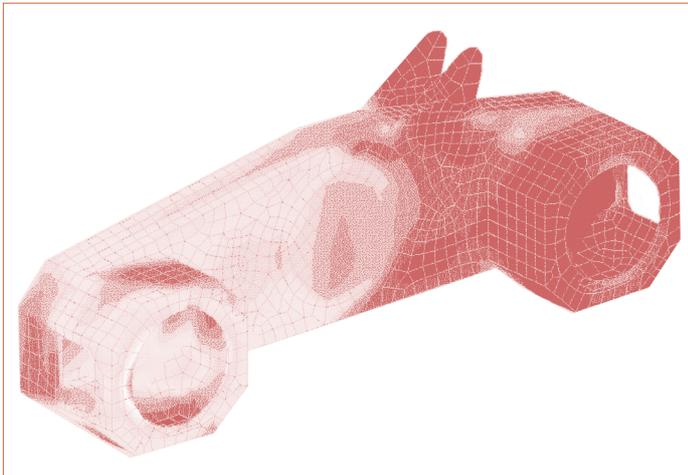
Enfin, lorsque l'avant projet de l'équipement donne des résultats satisfaisants sur le plan du comportement dynamique, la vérification de la résistance des différents composants est indispensable. Pour cela, un outil de calcul de structure (éléments finis, voir Encadré 3) est utilisé. La pièce à calculer (châssis, composant, etc ...) est tout d'abord «discretisée» (maillage en plaques, coques, poutres, volumes). Des sollicitations (forces, accélérations) issues des résultats de simulations dynamiques sont appliquées et le calcul est lancé. Il est alors possible de visualiser des cartes de contraintes, des déformées, des modes de flambement ou de fréquences propres, etc ... La Figure 6 présente l'exemple du calcul d'un boggy de machine forestière pour lequel la carte des contraintes mécaniques a été visualisée (contraintes de «Von Mises»).

### Un concept et des méthodes appliqués à des projets industriels

Outre le concept de machine virtuelle en lui-même, le principal résultat de cette démarche est une méthodologie applicable sur des projets industriels de conception en mécanique et hydraulique (Figure 7). La démarche consiste à réaliser (à partir d'un avant projet) des premières simulations dynamiques afin d'évaluer et d'optimiser le comportement de l'équipement. Les boucles d'optimisation présentées en Figure 7 consistent en une reprise du projet par le concepteur (modification du positionnement des masses, nouvelle cinématique, etc ...).

Lorsque le comportement semble satisfaisant par rapport au cahier des charges, un projet d'ensemble plus détaillé est alors construit. Un nouvel ensemble de simulations dynamiques est alors lancé afin d'évaluer les efforts mis en jeu. Pour finir, ces sollicitations sont utilisées pour calculer (calcul de structure) et optimiser chaque composant et les plans finaux peuvent être réalisés. Une telle démarche a été conduite avec des partenaires industriels en équipements forestiers, en pulvérisation, en équipement de récolte de légumes, etc. ....

Parmi les différentes applications traitées, citons :



◀ Figure 6 : Carte des contraintes dans un boggie de machine forestière

- création de mécanismes complexes de préhenseurs dont les composants sont difficilement imaginables à la planche à dessin ;
- optimisation de machines forestières (têtes de bûcheronnage, porteurs, robots élagueurs ...) ;
- conception de machines de récolte à cinématique complexe ;
- optimisation de rampes de pulvérisation et de leur système de suspension ;
- Equilibrage dynamique de systèmes de battages et de vibrations ;
- optimisation de suspensions d'équipements agricoles ;
- réduction des oscillations, coups de bélier, etc. de systèmes hydrauliques.

### CAO, outil d'optimisation

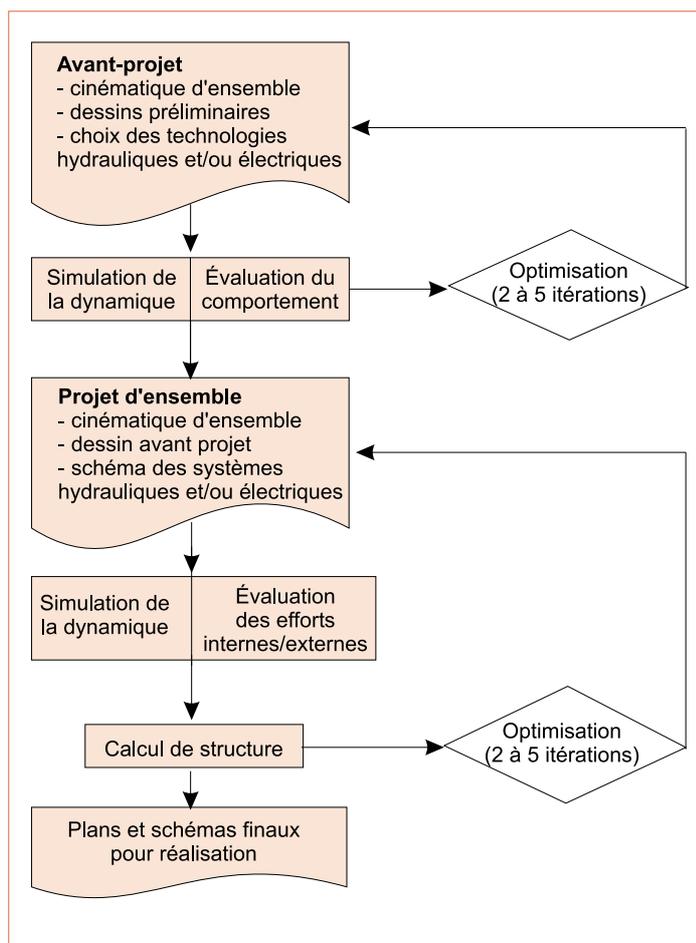
Les gains qualitatifs générés par l'utilisation de la CAO peuvent être une amélioration de la qualité graphique des plans ou une diminution des erreurs de tracé ou de cotation. Mais l'essentiel du gain est dans l'étendue des possibilités de création et d'optimisation d'ensembles ou de composants «mécatroniques» (composants mécaniques asservis ou pilotés par des systèmes électroniques).

Ainsi, si le coût de conception d'un équipement agricole ne représente en général que 3% à 10% de son coût global, c'est pourtant cette opération qui va conditionner à 90% le coût final du produit. En effet, un produit mal conçu coûtera plus cher en fabrication, en assemblage, en approvisionnement de composants, en service après vente, etc. L'adaptation du produit aux fonctions auxquelles il est destiné est totalement conditionné par ce travail de conception (efficacité, fiabilité, interchangeabilité des composants, ergonomie, sécurité d'utilisation, design, etc.). La CAO, associée à une démarche d'analyse de la valeur (*Encadré 5*), est donc un puissant outil d'optimisation. Les applications peuvent être très variées, depuis un équipement de grande série qu'il va falloir précisément optimiser, jusqu'à la conception de machines spécifiques (petites séries pour une filière agricole) mais soumises à des contraintes sévères (par exemple, franchissement tout terrain, stabilité dans les pentes, chaîne cinématique complexe, etc.).

### Conception, essais et expertise

Les connaissances nécessaires à une conception répondant au mieux aux besoins des utilisateurs ne sauraient être limités à la maîtrise d'outils de simulation et de calcul. L'expertise construite re-

Figure 7 :  
Démarche  
globale  
d'optimisation ▼



pose sur une analyse des fonctions des machines agricoles et des contraintes exercées par le milieu.

Illustrons ce propos à partir de l'exemple d'une machine forestière :

- Quelles sont les différentes configurations critiques ou de service ? A quelles situations (chocs, franchissements d'obstacles, configurations de travail, etc.) la machine va-t-elle être soumise ? De cette connaissance dépend l'élaboration du plan initial des simulations.
- Pour chacune de ces situations fonctionnelles et de service, il existe une multitude de configurations géométriques : angle de braquage, d'oscillation, positions des boggies, angle de la grue, ouverture de la grue, poids transporté, etc. La combinaison de toutes ces possibilités génère des milliers de cas possibles qu'il est impossible de balayer systématiquement.

L'expérience et l'expertise permettent de se ramener à un nombre limité de cas à simuler afin de couvrir la problématique d'un équipement donné.

D'autre part, la calibration de modèle et/ou l'identification de paramètres sont indispensables pour valider la modélisation (Figure 8). En particulier, le simulateur de vibration de Montpellier (Figure 9) permet, par des essais simples à conduire, de calibrer un modèle dynamique d'une machine agricole complète avec ses équipements. Il permet de reproduire des vibrations (pistes, signaux types, etc...) sur des semelles soutenant les pneumatiques.

La démarche « machine virtuelle » se trouve donc naturellement confortée par une démarche expérimentale qui sur le plan qualitatif nourrit l'expertise nécessaire à l'évaluation des configurations à envisager et, sur le plan quantitatif, permet de calibrer les modèles.

#### Encadré 5

### L'analyse de la valeur

L'analyse de la valeur est une technique d'approche systématique et organisée visant à réaliser aux moindres coûts les fonctions nécessaires à la satisfaction des besoins de l'utilisateur final du produit, à savoir l'agriculteur ou l'exploitant forestier dans notre cas. L'équipement considéré est décomposé en fonction d'usage (récolter, se mouvoir, ...), en fonctions techniques (lubrifier, refroidir, ...) et éventuellement en fonctions d'estime (correspondre à une ligne esthétique d'une société ...).

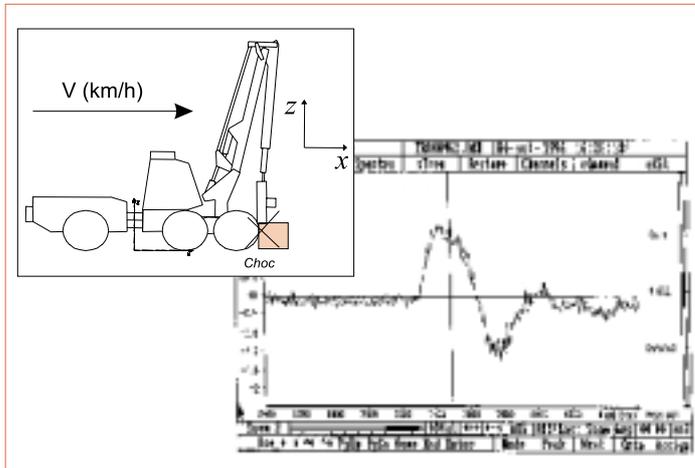
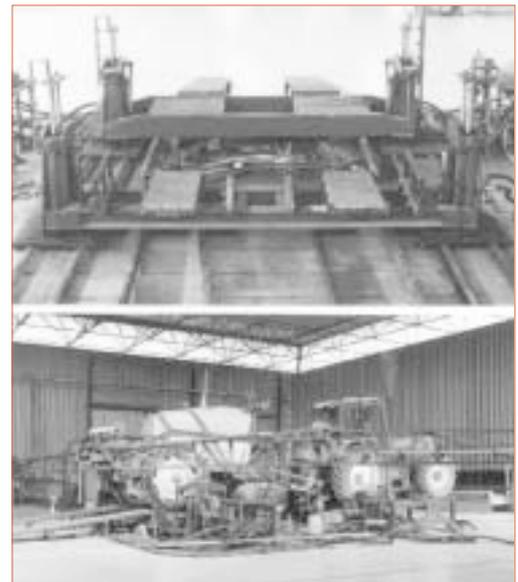


Figure 8 : Mesures d'accélérométrie sur une machine forestière (calibration de modèles CAO)

Figure 9 : banc «simulateur» du Cemagref



### Conclusion, perspectives :

La maturité de la démarche «machine virtuelle» va permettre dans les années à venir de réduire de façon significative la durée et le coût de conception et de mise au point des équipements.

Par rapport à une démarche purement expérimentale passant par deux ou trois prototypes, le temps gagné en aval sur la mise au point et l'optimisation doit être investi en amont pour obtenir des données à utiliser dans les modèles (par exemple caractéristiques de pneus, efforts et énergies mis en jeu dans la coupe de branches, profils de ter-

rains agricoles ou forestiers, etc.). Par contre, cet investissement amont est une connaissance capitalisable qui peut être utilisée pour des études ultérieures.

Le développement prévisible de cette démarche chez les concepteurs d'équipements agricoles devrait donc d'une certaine manière engendrer un grand nombre d'études expérimentales ou théoriques afin d'acquérir des données sur les phénomènes modélisés. L'utilisateur final bénéficiera quand à lui d'un produit plus performant et mieux optimisé. ■

### Résumé

La conception d'équipement agricole utilise de plus en plus des logiciels de Conception Assistée par Ordinateur. Ceux-ci sont en train d'évoluer vers un ensemble cohérent d'outils permettant à la fois la modélisation géométrique dans l'espace, mais aussi des simulations dynamiques et du calcul de structure. L'utilisation combinée de ces outils permet de tendre vers le concept de machine virtuelle. Des méthodes et des exemples d'application sont présentées, ainsi que les implications d'une telle démarche en synergie avec les essais ou expérimentations.

### Abstract

Designers of Agricultural Equipment take more and more advantage of " Computer Aided Design " software. These sophisticated programs are evolving towards a consistent set of tools allowing not only to describe the geometry of parts in 3 dimensions but also to perform simulation of dynamics and structural analysis. The virtual machine concept can be put, in a certain extent, into industrial design practice thanks to appropriate methods and tools combination.. Methods and examples are presented, together with the implication of such a design process for tests and experiments.

### Bibliographie

ROUX, P., 1998. CAD in agricultural equipment design, *Proceedings XIII<sup>th</sup> congress CIGR*, Rabat, volume 3, page 409-416

DADS 8.5 (software), Reference manual, CADSI 1997

HERMAN T., 1993, *Contribution à la synthèse d'une commande énergétique optimale pour le contrôle en position de systèmes hydrauliques de puissance*, Thèse, Université de Bordeaux.

THOLLOT J., BONICELLI B., august 6-12 1995, Information technology for forestry machines, *IUXRO XX World Congress*, Tampere-Finland, Session S3.04-01 Voluntary paper

THOLLOT J., 1994, Adaptive control of an hydraulic cylinder : a system performance based approach ; Proc., *Innovations in Fluid Power (7th Bath International Fluid Power Workshop)*, pp 161-175, Bath-England, September 21-23.

HUNTER, A. G. M., 1991, Stability of agricultural machinery on slopes. In : *Matthews, J. (ed.), Progress in Agricultural Physics and Engineering, C. A. B. International*, Wallingford, UK, ch. 4, pp. 83-118

HUNTER, A. G. M., 1992, *A review of research into machine stability on slopes*. Paper N° 9201/23, International conference on agricultural engineering AG ENG 1992, June 1-4, 1992, Uppsala, Sweden.

MEIER-NOE, U., SCHLÜTER, F., WOLF, M., 1998, The use of Physical Modelling and Object-oriented Databases for the Development of Mechatronic Systems. ICMA'98 Conference.