



PLATEFORME LOGICIELLE POUR L'OPTIMISATION GLOBALE DES CONSTRUCTIONS METALLIQUES

A. BENANANE¹, A. OUAZIR¹, S. BENANANE², M. TITOU³, S.M. BOURDIM¹

¹ Laboratoire de Matériaux et Procédés de Construction– Université de Mostaganem, Algérie.
abdelkaderbenanane@yahoo.fr, abderouazir@yahoo.fr, [bourdim80@yahoo.fr](mailto:bourdime80@yahoo.fr)

² Laboratoire de Mécanique des Structures et Stabilité des Constructions –Université USTO, Algérie.
benanane.sofiane@yahoo.fr,

³ Laboratoire de Matériaux et Mécanique des Structures– Université de M' Sila, titoum65@yahoo.fr

Réception : 07 /09/2017

Acceptation : 05/12/2017

Publication : 31/01/2018

Résumé: *Le présent travail constitue la deuxième version de notre plate-forme logicielle de recherche que nous développons progressivement pour la rendre opérationnelle et brevetable. Cette version inclut les contraintes de l'Eurocode 3 en particulier celles relatives à l'instabilité élastique. En effet, le projet 'multi-métiers' est un cadre générique permettant de développer des applications d'optimisation de produits, à partir de paramètres appartenant à des "métiers" différents intervenant dans la conception de ce produit. Cette méthodologie permet non seulement de résoudre le problème de transfert et de traitement des connaissances entre les différents opérateurs d'un même projet, mais aussi de faire évoluer les outils spécifiques à chaque discipline de façon autonome, en particulier les boucles et les algorithmes d'optimisation, en considérant le «multi-métiers», comme un métier particulier. L'application présentée concerne la construction métallique dont on cherche à optimiser les points de vue de trois disciplines: le bureau d'études «Structures», le bureau d'études "Géotechnique" et le bureau d'études "Béton armé".*

Mots - clés : Optimisation multi-métiers, Conception assistée par ordinateur, Systèmes experts, Intelligence artificielle, Ingénierie concurrente.

Abstract: The present work is the second version of our software platform research which we develop gradually to make it operational and patentable. This version includes the constraints of Eurocode 3 in particular those related to the elastic instability. Indeed, the 'Multidisciplinary project' is a generic framework for developing optimization applications of products, from parameters belonging to different «disciplines» involved in the design of this product. This methodology can not only solve the problem of transfer and processing of knowledge between different operators of a same project, but also to improve the tools specific to each discipline independently, especially loops and optimization algorithms, by considering the "Multidisciplinary" as a particular discipline. The application submitted concerns the steel construction in which we want to optimize the viewpoints of three disciplines: "Structures Engineering Office," the "Geotechnical Engineering Office" and the "Reinforced Concrete Engineering Office".

Keywords: Multidisciplinary optimization, Computer aided design, Expert systems, Artificial intelligence, Concurrent engineering.

1- Problématique

Dans les années 80, les bureaux d'études sont organisés en différents centres d'activité bien distincts, chacun réalisant une des phases

du cycle de conception du produit comme l'illustre la figure 1.

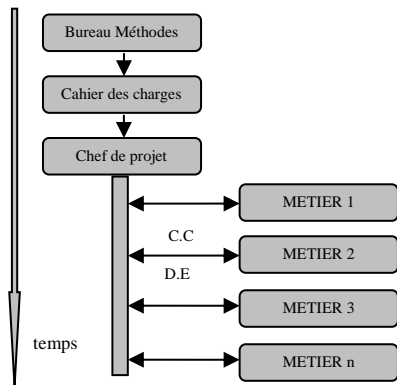


Figure 1: Sequential organization of the design cycle of building

Bien que cette organisation permette une circulation du flux d'informations clairement défini et facilement maîtrisable, elle présente beaucoup d'inconvénients qui peuvent remettre en cause l'existence même de l'entreprise.

–L'un des principaux défauts de cette organisation est l'effet "goulot d'étranglement" qui peut être engendré à chaque blocage d'un des services de l'entreprise. En effet, si l'un des services est en retard dans la réalisation de sa tâche, c'est l'ensemble du cycle de développement du produit qui est ralenti.

–La deuxième défaillance que présente cette organisation séquentielle est liée au fait que chaque service est dépendant du service situé en amont. Cette situation réduit énormément la marge de créativité des services et peut déboucher sur une impasse surtout pour les services situés en fin du cycle qui doivent satisfaire à la fois les objectifs de tous les autres services et tenir compte des "règles métier" liées à leur propre environnement.

Face à la concurrence de plus en plus forte, les entreprises se sont réorganisées. Elles tendent actuellement à paralléliser leurs activités dans le but d'améliorer les facteurs coût, qualité et délai. C'est dans cette optique que le concept d'ingénierie simultanée (concurrent engineering) a vu le jour et que l'organisation séquentielle devrait être remise en cause Réf. [6].

Toutefois, cette nouvelle appréhension du processus de conception de produits ne peut aboutir, à notre avis, sans l'application de plusieurs techniques indissociables à savoir l'ingénierie simultanée, l'ingénierie de la connaissance et le génie logiciel.

2- Proposition d'une méthodologie de résolution

2.1-L'ingénierie simultanée

Selon Dean et Unal Réf. [2], l'ingénierie concurrente (concurrent engineering) consiste à faire coopérer les bonnes personnes au bon moment afin d'identifier et résoudre les problèmes de conception. Cette approche est basée sur deux idées fondamentales :

–La mise en parallèle des services dont l'objectif est de réduire la perte de temps occasionnée par l'attente d'achèvement d'un dossier par un service pour le démarrage du travail dans le service suivant. Cette nouvelle organisation permet donc à tous les acteurs de commencer leur travail simultanément.

–La mise en place d'équipes pluridisciplinaires pour éviter le cloisonnement des services. Le regroupement de spécialistes des différents services de l'entreprise diminue nettement les risques d'erreurs dans le cycle de développement de nouveaux produits puisque les équipes jouissent d'une vision globale des contraintes et règles à respecter.

Néanmoins, la mise en pratique d'une telle organisation est irréalisable pour la majeure partie des entreprises puisque cette solution conduit à des surcoûts de fonctionnement excessifs notamment à cause de la nécessité d'utiliser du personnel hautement qualifié et expérimenté.

Devant cette réalité, plusieurs auteurs ont proposé des visions plus pragmatiques de l'application de l'ingénierie simultanée. Ce fût le cas de Jagou, Réf. [5] qui se base sur le schéma de la figure 2 où les différents services sont organisés plutôt en cascade qu'une mise en parallèle directe.

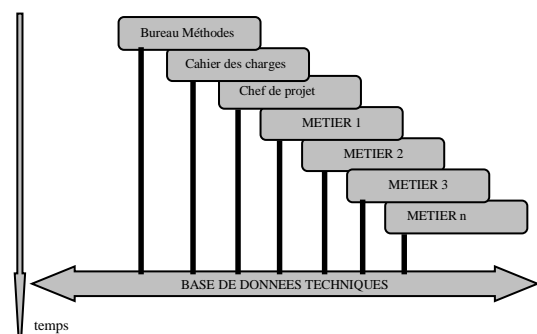


Figure 2: Organization of the concurrent engineering type



Toutefois, cette nouvelle organisation n'est pas sans risque. La maîtrise des informations circulant entre les différents centres d'activités est primordiale en ingénierie simultanée. L'entreprise doit donc améliorer son système d'informations pour permettre à chaque membre d'un projet de disposer en temps opportun de toutes les informations fiables qui lui sont utiles pour progresser dans son travail. À partir de ce niveau-là, un autre domaine de recherche dénommé "Ingénierie de la connaissance" vient prendre le relais pour compléter l'enchaînement de l'ingénierie simultanée.

2.2-L'ingénierie de la connaissance

La gestion et le contrôle des informations (connaissance) circulant entre les différents centres d'activité est actuellement une des préoccupations majeure de l'entreprise contrairement à l'organisation linéaire qui n'impose que la maîtrise de leur transfert.

L'emploi de solutions dites intégrées n'a apporté qu'une solution partielle au problème de partage de l'information Réf. [4]. En effet, le regroupement des fonctionnalités des outils de chaque service de l'entreprise dans un même logiciel (SBC : système à base de connaissances) est une approche intéressante du point de vue de la compatibilité des données mais en règle générale, ces outils ne prennent pas en compte la globalité des informations à traiter et sont cloisonnés à un domaine particulier du cycle de développement d'un produit. En outre, ces outils ne disposent pas de fonctionnalités permettant de connaître, à tout instant, le détenteur de l'information et l'état d'avancement du projet.

Pour assurer ces dernières fonctions, de nouveaux outils sont alors apparus sur le marché : les Systèmes de Gestion de Données Techniques "SGDT" Réf. [1]. Ces systèmes sécurisent le transfert d'informations et facilitent la mise à jour des données partagées mais ne permettent pas une vérification de la cohérence des solutions.

Malgré cet énorme avantage, ces outils n'apportent qu'une solution partielle à la réduction des risques liés à l'utilisation du concept de l'ingénierie simultanée. En fait, ils n'offrent pas de fonction permettant de garantir la « faisabilité » d'un produit tout au long de son cycle de développement (ici cycle de conception).

Depuis quelques années seulement, un nouveau produit informatique a fait son apparition sur le marché des logiciels. Il s'agit des Systèmes de Gestion des Connaissances Techniques Réf. [3]. Plusieurs techniques de représentation de connaissances ainsi que des mécanismes de raisonnement associés ont été développés dans de nombreux travaux de recherche (réseaux sémantiques, graphes conceptuels, représentation à base de frames, modèles orientés objet). Chacune de ces techniques a apporté des contributions intéressantes dans le domaine de la représentation des connaissances tout en présentant quelques insuffisances liées notamment au couplage entre la puissance de représentation des connaissances et les impératifs d'implémentation (modélisation / opérationnalisation).

2.3- Le génie logiciel

Nous constatons finalement que chacune des méthodologies issues que ce soit, du domaine de l'ingénierie des connaissances (génie cognitif) ou du génie logiciel, ne peut satisfaire nos besoins. Cette raison nous a donc conduit à développer un nouveau formalisme de modélisation mieux adapté à notre problématique. En conséquence, la plate-forme dite « multi-métiers » associant à la fois les qualités des systèmes à base de connaissances et des systèmes orientés objet, permet non seulement de résoudre les problèmes liés à la persistance des modèles à bases de connaissances mais aussi de les rendre évolutifs à chaque instant. En définitive, compte tenu du caractère "multi-métiers" du processus de conception, il apparaît difficile d'adopter un formalisme unique pour les algorithmes des différents centres d'activité intervenant dans l'élaboration d'un même projet. Toutefois, la méthodologie originale que nous proposons permet de représenter fidèlement le cycle réel de la conception "multi-métiers" par le biais d'un traitement spécial des connaissances de chaque classe issue de la modélisation conceptuelle. Par ce formalisme puissant, le modèle opérationnel se confond avec le modèle conceptuel. En effet, un processus interactif d'extractions et de réintroductions de connaissances à partir d'une modélisation initiale du système permet de régénérer de nouvelles connaissances à l'intérieur des classes. Cette approche permet

de rendre le système évolutif à chaque instant. Des concepts de type "test" ou "point de vue" permettent d'arrêter en temps opportun le mécanisme d'itération qui se déclenche automatiquement. Ensuite, des passerelles appropriées assurent interactivement le transfert de ces connaissances acquises entre les différentes classes du modèle, ce qui permet d'aboutir à un nouveau modèle intégrant cette fois-ci le caractère multi-métiers puisqu'il tient compte des connaissances de l'ensemble des classes du système. Par l'intermédiaire de cette technique, la cohérence du modèle est parfaitement assurée à chaque instant. Enfin, un système de filtrage permet de contrôler à chaque étape la "faisabilité" des modèles obtenus et de sélectionner celui qui répond le mieux à tous les points de vue au sens de certains critères. En outre, un choix judicieux de la nature des classes "concept métier" et de la spécificité de leurs attributs ainsi que des procédures de traitement adaptées nous ont permis de contourner les problèmes liés au couplage (puissance de représentation des connaissances/impératifs d'implémentation) rencontrés dans la plupart des systèmes à base de connaissances existants dans la littérature.

3- Le projet "multi-métier"

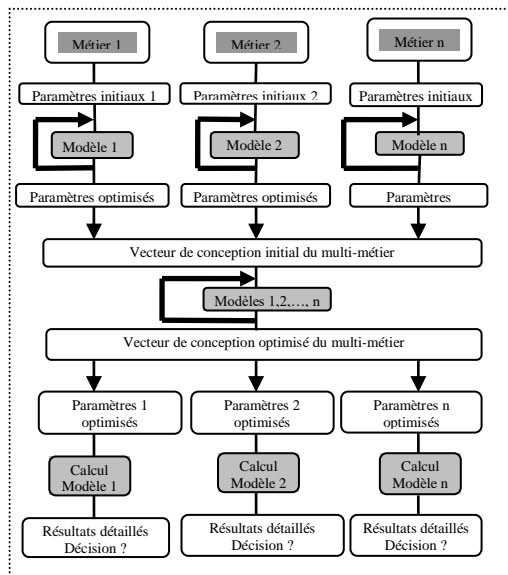


Figure 3: Functional graph of the multidisciplinary platform

La plate-forme "Multi-Métier" offre un cadre générique permettant de développer des applications d'optimisation de produits, à partir de paramètres appartenant à des "métiers" différents intervenant dans la conception de ce produit. Cette plate-forme de logiciels permet non seulement de résoudre le problème de traitement et de transfert des connaissances mais également de faire évoluer les outils propres à chaque métier de manière autonome, en particulier les boucles et algorithmes d'optimisation, en considérant le "Multi-métier" comme un métier particulier.

Le formalisme de cette méthodologie est représenté par la figure 3.

3.1- Étapes d'élaboration d'une application

3.1.1- Choix du contexte

Par "contexte", on entend l'ensemble des choix préalables à l'optimisation, regroupant les paramètres qui ne varieront pas. Par exemple, la topologie du bâtiment (produit) est fixée, les matériaux sont connus, etc....

3.1.2- Construction des fonctions objectifs et des contraintes d'optimisation

On pourra définir des fonctions objectifs par métier, conduisant chacune à autant de boucles d'optimisation. Pour les fonctions objectifs du "multi-métier", la seule obligation est qu'elles doivent faire appel aux mêmes paramètres que les fonctions objectifs des métiers concernés. Les contraintes seront énoncées par métier, conduisant à la définition de l'espace des solutions à rejeter par les algorithmes. Il s'agira la plupart du temps de contraintes inégalités de type seuil, la cohérence physique étant assurée par l'utilisation d'un modèle « éprouvé ».

3.1.3- Identification des algorithmes utilisables

Les algorithmes d'optimisation dépendent de la fonction objectif choisie ainsi que des contraintes de conception. Dans tous les cas, il s'agit de minimisation sous contraintes (réglementation et normes en vigueur). Actuellement, deux catégories d'algorithmes sont implémentés :

- un algorithme de Monte-Carlo "pur", basé sur un tirage au sort d'un jeu de paramètres, suivi d'un repositionnement au point

correspondant à la fonction objectif minimale, puis d'un nouveau tirage, etc. ...Il se peut que le nouveau minimum soit supérieur au minimum de l'itération précédente, dans ce cas on procède à une "reprise" de tirage. Les contraintes sont satisfaites par simple filtrage des solutions obtenues. L'avantage est la grande robustesse de cet algorithme, qui s'accommode de n'importe quelle forme de fonction objectif et permet de prendre en compte les contraintes facilement ; l'inconvénient est le nombre de calculs élevé et parfois l'impossibilité d'atteindre le minimum absolu (on ne peut que s'en approcher).

– un algorithme de Levenberg-Marquardt qui permet de tendre vers le minimum absolu, mais qui nécessite une fonction objectif de type "moindres carrés" et dont la prise en compte des contraintes par pénalisation est plus délicate.

Ces algorithmes peuvent manipuler des paramètres continus tels que le diamètre d'une barre de section circulaire, ou des paramètres discrets tels que la hauteur d'un profilé de type commercial.

4- Implémentation numérique

L'application présentée concerne la construction métallique dont on recherche une optimisation rassemblant les points de vue de trois métiers : le Bureau d'Études « Structures métalliques », le Bureau d'Études « Géotechnique » et le Bureau d'Études « Béton armé ». Nous présentons ci-dessous les choix retenus pour la version actuelle de la plate-forme « OptiMétal » qui est conçue à partir de la figure 4 ci-dessous.

Les pointillés montrent les relations entre les fichiers de connaissances acquises par le système et les logiciels correspondant à chacun des métiers.

À partir de la connaissance des caractéristiques de sections de barres et de semelles issues du vecteur des paramètres de conception (tirage de Monte-Carlo), le logiciel de structure évalue les actions de contact et les contraintes maximales dans la structure (figure 5).

Les actions de contact sont alors utilisées par le logiciel de calcul des tassements (figure 6). La boucle d'interaction sol-structure se poursuit jusqu'au test d'arrêt. Le logiciel de calcul de béton armé (figure 7)

évalue alors les poids d'acier de ferrailage et de béton des fondations, à partir de couches.txt, semelles.txt et de réactions.txt (dernière valeur de la boucle d'interaction). Ensuite, le logiciel du Multi-métier évalue le montant de la construction pour le jeu de paramètres de conception considéré. Enfin, La boucle d'optimisation se poursuit jusqu'à la satisfaction des critères d'évaluation (critère de satisfaction Monte-Carlo).

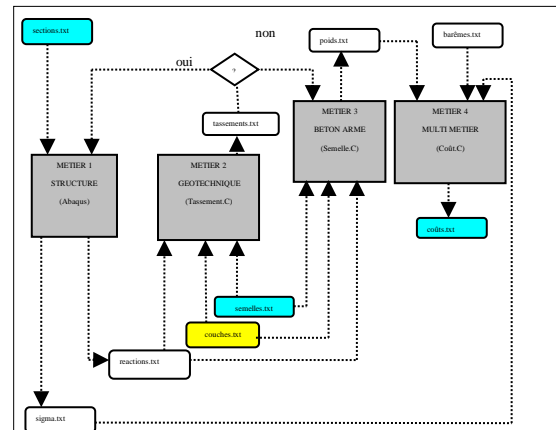


Figure 4: Modeling of "Optimétal" platform

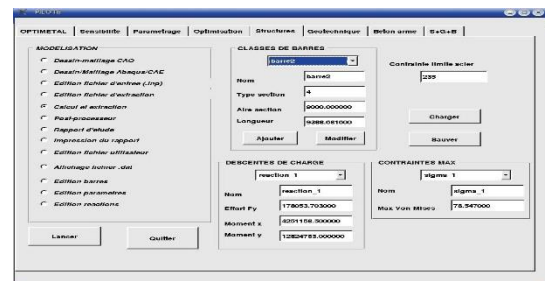


Figure 5: Graphic interface of "Structure" discipline

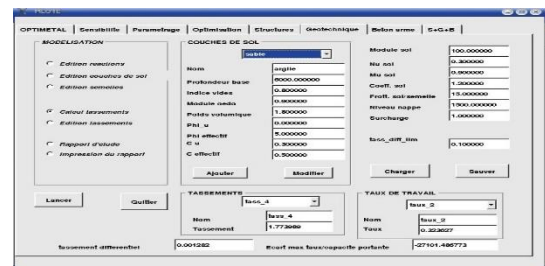


Figure 6: Graphic interface of "Géotechnics" discipline

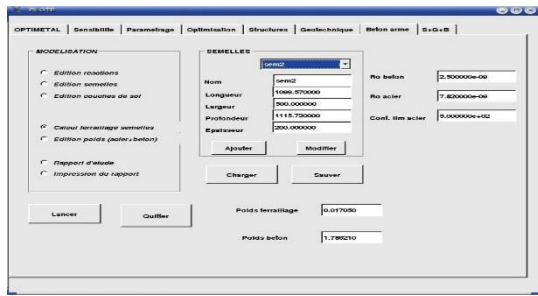


Figure 7: Graphic interface of "Reinforced concrete" discipline

5- Apport de la méthodologie

Pour montrer l'intérêt de la méthodologie proposée, nous avons adopté la démarche qui consiste à évaluer la même structure (figure 8) par deux méthodes différentes :

–la première suivant l'approche classique c'est-à-dire celle qui correspond à une organisation séquentielle du cycle de conception (il s'agit d'optimisation classique ou mono-métier).

–la deuxième avec l'outil que nous avons mis en œuvre et qui correspond à une nouvelle organisation de type ingénierie simultanée (il s'agit d'optimisation multi-métier).

Dans la première approche, nous optimisons d'abord chaque métier séparément, ensuite nous évaluons la construction dans sa globalité. Nous avons arrêté, pour une structure tridimensionnelle simple avec des paramètres de conception de type continu, le processus d'optimisation après 7 calculs de 2 itérations chacun car nous estimons que la convergence est suffisante étant donné que les contraintes Von Mises et l'écart minimum se stabilisent à des valeurs jugées admissibles (au total, il y a eu 126 tirages de Monte-Carlo).

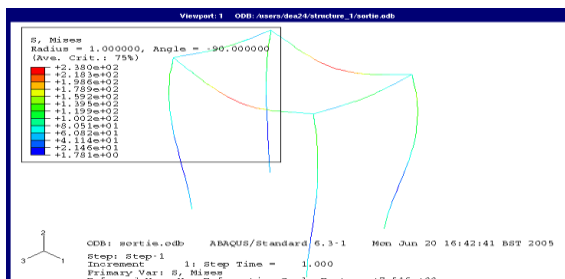


Figure 8: Structure 3D with circular sections

Par contre, dans la deuxième approche, le système informatique proposé évaluera, directement et globalement la construction. Il faut noter que chaque itération de Monte-Carlo a nécessité 81 tirages (soit 243 calculs au total pour cette structure). L'analyse des deux méthodes donne le tableau 1 de synthèse suivant :

Table 1: Comparative study of the two methods

	STRUCTURE		FONDACTIONS			COUT TOTAL
	Section Poteaux (mm ²)	Section Poutres (mm ²)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Profondeur (mm)	(euros)
Approche classique	350.00	300.00	1000.00	500.00	2000.00	1498.50
Approche Multi-Métier	464.64	181.96	742.5	352.4	2000.00	846.21

L'apport de cette méthodologie peut être représenté par le rapport des coûts engendrés par chacune des deux alternatives.

$$R = \frac{846.21}{1498.50} = 0.5647$$

soit approximativement un gain de 43%

6- Conclusion

Il apparaît donc que cette approche est très prometteuse et doit être affinée par un certain nombre de mesures avant la validation des résultats obtenus. En effet, par souci d'objectivité, l'ordre de grandeur du gain de coût constaté sur cet échantillon ne peut faire l'objet d'une généralisation pour la simple raison que notre outil est à sa première version et il n'intègre donc pas toutes les contraintes d'optimisation liées aux Eurocodes en matière de calcul de résistance, de stabilité et de dimensionnement des constructions.

En phase finale de version, un vaste programme de simulations numériques sur différentes typologies peut permettre d'élaborer des règles "métier" qui serviront à diriger, en phase précoce, les concepteurs vers des solutions globales optimisées.



Ce travail de recherche ouvre des perspectives plus larges puisqu'il s'inscrit à l'interface de quatre types de préoccupations scientifiques à savoir : la conception de systèmes d'aide à la décision (systèmes experts), la modélisation et la gestion des systèmes complexes (ingénierie de la connaissance), les systèmes multi-agents ou multi-métiers (ingénierie simultanée) et, enfin, l'optimisation multicritère. Il ouvre donc une perspective intéressante à tous les domaines liés au Multi-métier tels que l'aéronautique, l'aéronavale, l'automobile, etc.

Références bibliographiques

- [1] Aussenac-Gilles, N. et al., *L'acquisition des connaissances pour les systèmes à base de connaissances*, Editorial de la revue Intelligence Artificielle, 6(1-2), pp. 7-18, 2002.
- [2] Dean, E.B. and Unal R., *Elements of designing for cost*, AIAA'92 Aerospace design Conference, Irvine CA, 2001.
- [3] Duizabo, S. and Guillaume, N., *Les modes du transfert de connaissances dans les entreprises*, les cahiers du GRES, n° 9602, Université Paris Dauphine, France, 2006.
- [4] Eisenstadt, M., *Review of the KSSO/NEXTRA Knowledge Acquisition Tool for the VITAL Project*, HCRL Technical Report, 2005.
- [5] Jagou, P., *Concurrent Engineering: La maîtrise des coûts, des délais et de la qualité*, édition Hermès, Paris, France, 2007.
- [6] Proulx, D., *L'ingénierie simultanée : la voie future dans la mise au point de nouveaux produits*, Colloque Techindustrie 92, Fédération de l'automatisation du Québec, Canada, 1992.