

# Développement des produits biomécaniques par l'exploitation des esquisses dans la phase amont de conception

Y. BENABID<sup>a</sup>, T. CHETTIBI<sup>a</sup>, K. BENFRIHA<sup>b</sup>, V. RIEUF<sup>b</sup>, A. AOUSSAT<sup>b</sup>, C. BOUCHARD<sup>b</sup> and J. F. OMHOVER<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Laboratoire Systèmes Mécanique, Ecole Militaire Polytechnique, BP 17BEB Alger, Algérie*

<sup>b</sup> *Laboratoire Conception de Produits & Innovation, Arts & Métiers ParisTech, 151 Bd de l'hôpital Paris, France*

## Résumé :

*L'objectif de notre travail est de développer une approche basée sur l'exploitation des esquisses dans la phase amont de conception pour créer un produit innovant. afin d'apporter une aide aux concepteurs des produits orthopédiques (prothèses de genou, de la hanche, disques vertébraux, ...). Cette approche est basée sur la notion de coopération entre les ingénieurs et les chirurgiens orthopédistes. Le développement d'un produit biomécanique est conçu autour des modèles 03D réels issus des techniques de reverse engineering. Concrètement cet outil devrait apporter une assistance pour les acteurs de la conception pour innover mieux à travers la création des esquisses dans la phase amont par les chirurgiens. Pour cela notre approche fournit les éléments de base pour que le concepteur puisse construire le produit. Les résultats obtenus donnent une nouvelle vision pour le développement des produits orthopédiques autour de la notion « sur mesure pour chaque patient ».*

## Abstract:

*The aim of our work is to develop an approach based on exploiting sketches in the early design phase to create an innovative product. to provide assistance to developers of orthopedic products (knee prostheses, hip, records, ...). This approach is based on the concept of cooperation between engineers and orthopedic surgeons. The development of a biomechanical product is designed around the actual 03D models from reverse engineering techniques. Concretely this tool should provide assistance for those involved in the design to innovate better by creating sketches in the early design phase by surgeons. For that our approach provides the basic elements a designer to build the product. The results give a new vision for the development of orthopedic products around the concept "tailored for each patient."*

**Mots clefs : Esquisse, prothèses, processus de conception, images DICOM.**

# 1 Introduction

Le remplacement des parties osseuses par des prothèses s'est imposé comme l'une des interventions les plus pratiquées en chirurgie orthopédique et l'une des plus fiables. Et pourtant, pas une seule consultation où n'apparaissent ses limites, voir ses complications. Par exemple, aujourd'hui, on compte plus de 250.000 remplacements de prothèses de genou effectués dans le monde par an. D'autres données statistiques ont estimé une tendance d'augmentation de 673% vers 2030 [1].

En marge d'une forte demande de ces prothèses, leur commercialisation s'est très vite répandue dans le marché orthopédique universel. Le marché européen des implants représente 910 millions d'euros pour la hanche et 960 millions d'euros pour le genou [2].

Par contre en Algérie les raisons de l'implantation des prothèses sont multiples sur les dix dernières années. En effet, le service de rhumatologie de l'établissement hospitalier spécialisé de Ben-Aknoun a enregistré, en 2001, 13851 consultations [2]. Les services de rhumatologie dans les hôpitaux algériens essaient de répondre à la demande et prendre en charge les cas qui se malgré les difficultés relatives essentiellement à la disponibilité des prothèses et l'anatomie de la population [3].

Les améliorations techniques concernent les prothèses (matériaux et designs adaptés aux différents cas) et également les techniques chirurgicales donnent un intervalle d'intervention des concepteurs, alors la conception des prothèses ou implants a pour objectif de rétablir la capacité fonctionnelle du patient [4-5]. L'arthroplastie est un acte dont de nombreux paramètres sont variables du fait essentiellement :

- De la multiplicité des types des prothèses;
- Des modes de fixation variables ;
- De l'effet opérateur associé à l'acte chirurgical et en particulier à la maîtrise de la technique chirurgicale ;
- Des caractéristiques liées au patient.

La réussite de ces prothèses est un compromis entre deux disciplines ; la bio-engineering et la chirurgie orthopédique qui ont fusionné, mis leur savoir en commun et rationalisé à la fois les gammes d'implants et les techniques de chirurgie opératoires, les prothèses sont disponibles dans une gamme de modèles générés par des ingénieurs, et la technique chirurgicale et la précision peuvent varier de chirurgien à un autre [6-7]. A cette fin, une procédure robuste, ordonnée et exhaustive doit être mise en œuvre depuis le diagnostic médicale jusqu'à l'implantation de la prothèse par le chirurgien spécialiste. C'est un cycle long de conception et de fabrication, et afin d'éviter les échecs liés aux processus de conception des prothèses, il faut développer d'avantage la phase amont de conception. Le développement de cette phase est basé sur l'exploitation des outils et des méthodes de conception via l'insertion des chirurgiens et des patients dans le processus de conception des produits biomécaniques et spécifiquement les prothèses. Ceci nous mène à fonder la problématique autour des questions suivantes :

Comment intégrer les chirurgiens orthopédistes dans le processus de conception? Quels outils qu'il faut utiliser? Quelles sont les étapes que comporte cette procédure ? Les résultats issus de ces étapes permettent-ils de caractériser le comportement de ces prothèses vis-à-vis des sollicitations auxquelles elles sont soumises ? C'est cette compréhension qui fait l'intérêt de ce travail.

Dans ce contexte, un outil est identifié au cours de nos travaux pour résoudre cette problématique, c'est la génération des esquisses [8]. Plusieurs environnements sont employés pour générer des esquisses par les spécialistes des produits orthopédiques, par des chirurgiens, par des techniciens, .... Notre objectif est de réaliser une base de données autour des esquisses générées et de construire un produit innovant où sur mesure pour des patients identifiés dans la phase amont.

Les esquisses sont réalisées dans les environnements: Papiers, CAO et réalité virtuelle. Comme entrées les fichiers DICOM et des images CT ainsi que des clichés 2D.

## 2 Méthodes et outils

### 2.1 L'acquisition des données

Les images sur lesquelles nous avons travaillé étaient sous format DICOM (Digital Imaging and COmmunications in Medicine) [9]. Il s'agit du format qui fait référence en matière de communication et d'archivage en imagerie médicale. Il a été mis en place en 1985 afin de standardiser les données provenant des différents instruments : radiographie, IRM, scanner, etc. un autre type de données utilisées c'est les clichés 2D.

Le standard DICOM permet, en plus des pixels de l'image, de stocker de nombreuses informations sur l'instrument de mesure mais aussi sur le patient (Etat civil, âge,...) et l'examen effectué (figure 1). Grâce aux gains de temps et à la facilité de son utilisation, ce format s'est vite imposé comme référence [10].

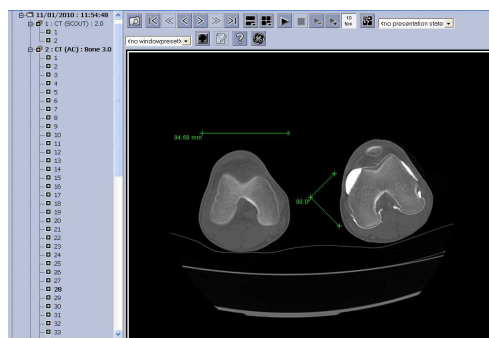


Figure 1. Standard d'archivage DICOM.

### 2.2 Les environnements de travail

L'identification des tâches de conception représente une description de l'activité de conception basée sur la caractérisation des échanges verbaux (actes de langage), des échanges gestuels et des échanges et interventions sur des objets intermédiaires entre les acteurs, lors de la coopération pour développer le produit.

Dans le cas de la conception des prothèses, après l'analyse fonctionnel du besoin, des équipes multidisciplinaires sont créées pour effectuer un échange de connaissance et un savoir faire. Le rôle de l'équipe de conception est de créer des concepts et le rôle de l'équipe chirurgiens et techniciens sera l'évaluation et l'assistance dans la phase amont de conception pour générer des esquisses autour des images DICOM.

Pour réaliser ces tâches de conception des environnements sont employés pour faciliter l'échange.

- Les environnements de créativité 2D, papiers et crayons
- Les environnements Conception assistée par ordinateur, 2D et 3D
- Les environnements Conception assistée par la réalité virtuelle 3D

L'identification de ces environnements est caractérisée par les critères de sélection et d'aide à la décision du produit. Un nombre considérable de ce travail a porté sur une approche descriptive pour comprendre l'activité de conception et de la cognition à travers la génération des esquisses en séances de créativité et observation des pratiques des participants. Notre objectif se concentre sur la sortie des résultats comme base de produits innovants, et implique l'observation des chirurgiens et techniciens par les ingénieurs et spécialistes de conception. Utilisation de l'environnement de CAO nous a permis de produire de grandes quantités d'idées dans un court laps de temps. Le grand avantage de cet environnement est le résultat du travail et cela par l'intervention des ingénieurs pour modifier les esquisses générées pour créer un produit final. Par contre le premier environnement qui est basé sur l'animation de la séance de créativité avec du papier et un crayon et de transformer les résultats dans

l'environnement CAO est un travail qui nécessite de longues étapes de traitement intermédiaires. Par contre l'environnement de réalité virtuelle offre une bonne exploitation pour les chirurgiens grâce aux outils disponibles et facile a utilisé dans cet environnement.

### 2.3 Choix des participants

En premier lieu notre travail fait l'analyse des fichiers des patients de sexe et d'âge différents (hommes & femmes) pour préparer le modèle de travail en s'appuyant sur des techniques de reverse engineering [3]. En deuxième lieu l'intervention des spécialistes, comme est indiqué sur le tableau 1, pour le développement des esquisses est nécessaire pour juger l'efficacité de la méthode et de l'outil.

<i>Participant</i>	<i>Année d'exercice</i>	<i>Autre activités</i>	<i>Spécialité</i>
Chirurgiens	C1	12 Fundamentals knowledge in CAD	Insert
	C2	20 No knowledge in CAD	Replacement of implant
	C3	23 No knowledge in CAD	Leader
Techniciens / orthopédiques	O1	07 knowledge in CAD and non control of RE techniques	Instruments
	O2	10 knowledge in CAD and non control of RE techniques	Implants materials & bone cut
	O3	16 knowledge in CAD and control of traditional techniques	Custom implants & bone cut
Ingénieurs / Conception / Fabrication	E1	05 knowledge in CAD and non control of RE techniques	SolidWorks environment
	E2	05 knowledge in CAD and non control of RE techniques	SolidWorks environment
	E3	12 knowledge in CAD and non control of RE techniques	CATIA environment
	E4	19 knowledge in CAD and non control of RE techniques	SolidWorks and CATIA environment

**Tableau 1. Les différents participants pour la génération des esquisses.**

### 2.4 Préparer l'environnement

L'environnement de génération des esquisses pour développer des produits orthopédiques par des chirurgiens et des ingénieurs doit permettre une tâche de réalisation des esquisses 2D et 3D. La conception d'un environnement simple pour des tâches d'apprentissage initiales sera la première étape. Le premier environnement papier nous permettra de réaliser des esquisses sur papier en 2D. Le deuxième environnement nous donne des esquisses 2D et 3D et la même chose pour l'environnement virtuel.

Dans une deuxième étape les fichiers CAO 3D sont exploités sous le dernier environnement pour créer des esquisses par les utilisateurs. C'est une vision pour avoir un produit sur mesure « Customized ».

Les conditions initiales sont de répondre à un questionnaire et réaliser des esquisses 2D et 3D. Les participants commencent par une phase d'apprentissage qui permet de comprendre les modalités d'interaction avec les périphériques employés ainsi de se familiariser avec la tâche à réaliser. La durée d'entraînement est limitée à quelques minutes pour la manipulation des outils. Il est demandé aux participants de réaliser des esquisses pour le futur produit en fonction de leurs expériences et suivant le cas présent (un implant ou prothèse sur mesure).

En premier lieu, le participant commence à remplir un questionnaire d'identification qui nous permet de recueillir les informations générales le concernant ainsi que les informations spécifiques. Ensuite, l'utilisateur se voit présenter l'expérimentation et les enjeux de celle-ci. Une explication écrite est donnée à chaque participant.

Une manipulation libre sous l'environnement virtuelle est envisagée afin de ce familiarisé avec les outils et de concentrer par la suite sur l'ensemble de la manipulation. L'environnement CAO est assisté par des ingénieurs. Des actions libres sur le troisième environnement. Une tâche similaire au produit à développer est expliquée aux participants afin de donner un aperçu sur le développement. A partir de cette tâche il est demandé aux participants de réaliser des esquisses autour des modèles proposés.

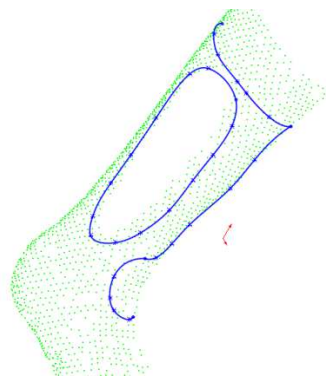


Figure 2. Esquisses réalisées dans l'environnement CAO (spline sur nuage de points)

Comme indiqué sur la figure 2, une esquisse générée par les participants pour donner les grands lignes du futur produit.

Les systèmes de CAO sont indispensables pour gérer la complexité du produit dans les applications médicales. Dans le procédé illustré à la Figure 3 et le tableau 3, l'objectif est l'intégration des utilisateurs afin de changer et de créer un environnement innovant et de collaboration pour réaliser un produit personnalisé pour chaque patient. Chaque concept doit être logé dans toute représentation et le présent processus décrit les différents outils et procédures pour trouver la solution de différents cas. Les idées contenues dans ce processus s'appuient sur l'hypothèse que les différents concepts d'un objet dépendent de différents contextes fonctionnels. Ainsi, la représentation des propriétés fonctionnelles des objets de design est à la base sous-jacente à la formation de différents concepts sur mesure.

Les esquisses générées à travers l'environnement 2D, comme illustré sur le tableau 2, sont les premières esquisses qui donnent un aperçu global sur le futur produit, l'inconvénient c'est l'exploitation efficace dans un intervalle de temps court pour créer un produit sur mesure.

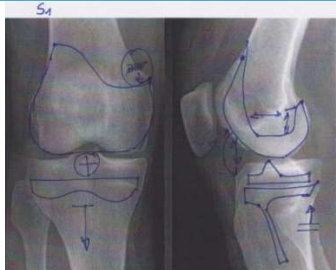
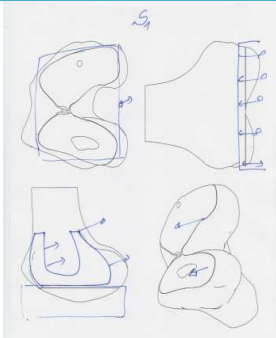
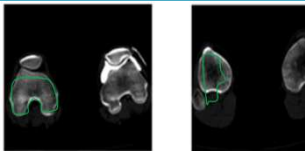
	Esquisses sur Image CT	Esquisses sur papier	Esquisses sur images DICOM
Esquisses à main levée réalisées par des spécialistes d'orthopédie			

Tableau 2. Esquisses réalisées par les chirurgiens

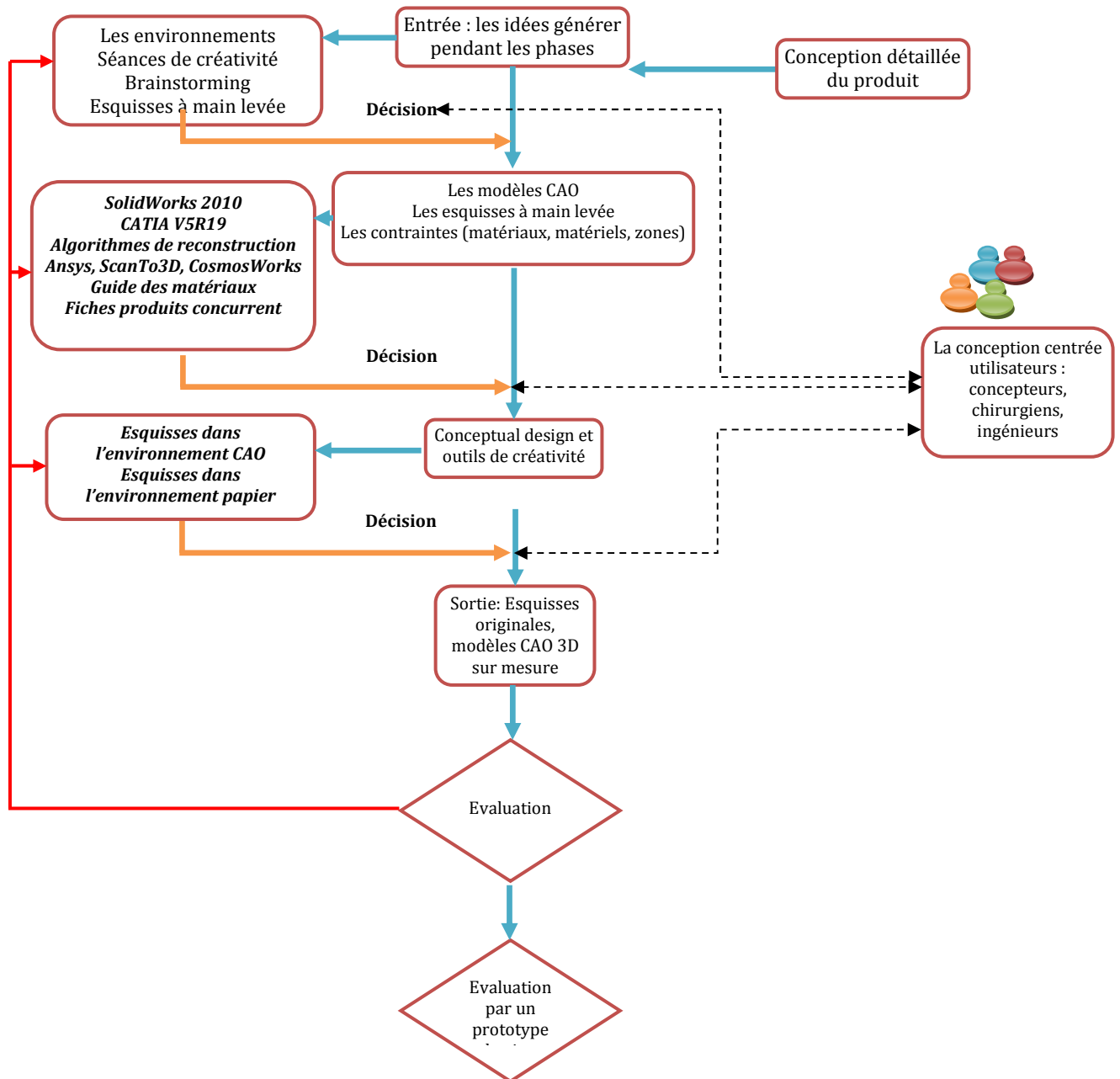


Figure 3. Esquisses réalisées dans l'environnement CAO



Tableau 3. Esquisses réalisées dans l'environnement de CAO

### 3. Résultats et discussion

Dans le processus de conception, il est nécessaire de définir et d'adapter un modèle tel que représenté dans la figure 3, qui est complète et conducteur de conception d'un implant par une équipe multidisciplinaire, ce qui représente des informations de conception du produit pour décrire l'ensemble du processus de conception. Dans notre travail, lancez les utilisateurs en fonction des besoins et l'idée novatrice à travers les esquisses générés et jugés utiles pour le développement et la conception des produits orthopédiques.

Les différents modèles de prothèses obtenus dans cette étude sont le fruit d'une collaboration entre plusieurs participants, tableau 4. Le lien entre eux est le processus de conception qui permet l'organisation et l'évaluation des environnements d'échanges tout au long du processus de développement du produit. Identification des métiers et des pratiques en différentes phases du processus de conception nous a permis de gagner du temps et d'améliorer le produit. Organiser des séances de créativité auprès des spécialistes pour intégrer l'utilisateur.

Par conséquent, cette étude développe l'intégration des connaissances et le mécanisme de partage pour la conception de dispositifs orthopédiques.

L'environnement de CAO et la collecte de données, au niveau de la conception amont en utilisant des techniques de reverse engineering aident au développement des connaissances et les résultats qui contribue de manière significative au produit innovant.

Les résultats obtenus par les techniques de reverse engineering sont des nuages de points. L'exploitation de cet aspect dans le processus de conception est une tendance croissante dans la structure du processus de conception assistée par ordinateur et la pratique du design, causée principalement par la disponibilité du puissants algorithmes développé, et qui sont en mesure de générer les points à partir des fichiers DICOM. Cet outil est la première contribution de ce travail afin d'enrichir les étapes du processus de conception.

Grâce au nuage de points qui a été mis en œuvre pour développer des produits innovants avec succès dans un environnement de CAO soutenu par l'environnement papier 2D en utilisant des esquisses à main levée. Les Expériences ont mené à réaliser une base de données des esquisses à main levée des différents participants, ce qui est la deuxième contribution de ce travail.

Les Esquisses réalisés par différents participants sont mieux placés pour proposer différentes idées novatrices. Les Esquisses 3D dans les nuages de points sont finalisées par les ingénieurs, après la collecte des données. Ces esquisses 3D sont préparées dans les étapes de conception en amont. La préparation de l'évaluation du processus par prototypage rapide selon le modèle CAO 3D obtenue pour le produit dans l'environnement de CAO. L'amélioration des esquisses faits intervenir un troisième environnement qui est la réalité virtuelle. Ce dernier offre une flexibilité pour les chirurgiens via les outils d'interaction disponibles dans l'environnement.

Le produit obtenu et son influence dans l'amélioration de la marche des patients est la contribution et l'intérêt du nouveau processus de conception.



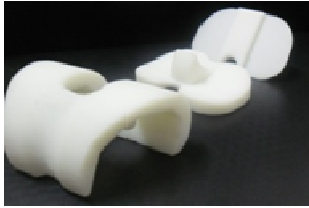


	Prothèse totale de genou PTG	Prothèse de la hanche PTH	Orthèses
Prototypage du produit			

Tableau 4. Prototypes de produits obtenus sur la base des esquisses générées

## 4. Conclusion

C'est un travail de recherche qui répond à un besoin d'installer une approche de réalisation des produits orthopédiques, afin d'innover et d'éviter les échecs liés aux pratiques des activités de conception, à travers l'intégration des chirurgiens dans la phase amont de développement.

Nous avons constaté que les concepteurs ont été amenés à prendre des décisions déterminantes sur la base des esquisses générées par des spécialistes d'orthopédie. Malgré cela, la recherche d'une décision valide a nécessité un nombre important d'essais sur des produits différents (prothèse de genou, prothèse de la hanche, les orthèses passive et dynamique, ...). De plus, la solution proposée pouvait être améliorée pour minimiser les indicateurs de performance et d'identification pour chaque phase et environnement l'outil efficace.

## Références

- [1] Marjan Bahrami Nasab, Mohd Roshdi Hassan. "Metallic Biomaterials of Knee and Hip". Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Engineering Faculty University Putra Malaysia. *Accepted 5 September 2009, Published online 25 January 2010.*
- [2] Journal: Le Soir d'Algérie, JOURNEES NATIONALES DE RHUMATOLOGIE, L'épineux problème de prothèses', Algérie - 23/05/02.
- [3] Y. Benabid, A. Aoussat & T. Chettibi Design of high-flexion total knee prosthesis considering activities of North African peoples, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* Vol. 14, No. S1, August 2011, 21–23
- [4] Laetitia Rossi, Jean-Marc Linares, Julien Chaves-Jacob, Jean Mailhe, Jean-Michel Sprauel, Design optimization using Statistical Confidence Boundaries of response surfaces: Application to robust design of a biomedical implant, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63 (2014) 141–144
- [5] Sereno L, Ferrer I, Soy F, Salvador A, Elías-Zuñiga A, Perez T, Ciurana Q Designing and Prototyping of New Device for Scapholunate Ligament Repair. *Procedia CIRP* (2013) 5:270–275.
- [6] Clare K. Fitzpatrick, Chadd W. Clary, Paul J. Rullkoetter, The role of patient, surgical, and implant design variation in total knee replacement performance, *Journal of Biomechanics* 45 (2012) 2092–2102
- [7] Heesuk Kang, Jason P. Long, Gary D. Urbiel Goldner, Steven A. Goldstein, Scott J. Hollister, A paradigm for the development and evaluation of novel implant topologies for bone fixation: Implant design and fabrication, *Journal of Biomechanics* 45 (2012) 2241–2247
- [8] Y. BENABID, Contribution à l'amélioration du processus de conception des produits innovants : Développement d'outils d'aides au choix d'un processus, Thèse de doctorat, Arts et Métiers ParisTech/EMP, 2014.
- [9] Y. BENABID, T. CHETTIBI, K. BENFRIHA, A. AOUSSAT, reducing the noise in medical images (DICOM format) to create a cad model of bones – case of hip joint and knee joint – *Biomedical Engineering International Conference BIOMEIC'12*, October 10-11, 2012 Tlemcen, Algeria
- [10] T. Jansoone. "Représentation de connaissances anatomiques a priori dans des modèles géométriques: le cas du genou". Rapport TER du laboratoire EVASION de l'INRIA. Mai 2009.