

Laboratoire virtuel de métrologie dimensionnelle

Projet en développement

Alex Ballu, Xingyu Yan, Halidou Niandou

Univ. Bordeaux, I2M, UMR 5295,
33400 Talence, France

alex.ballu@u-bordeaux.fr, xingyu.yan@u-bordeaux.fr,
halidou.niandou@u-bordeaux.fr,

Serge Mouton

Univ. Bordeaux, Collège Sciences et Technologies,
33400 Talence, France

serge.mouton@u-bordeaux.fr

Christophe Michenaud

Univ. Bordeaux, MAPI,
Mission d'Appui à la Pédagogie et à l'Innovation,
33000 Bordeaux, France

christophe.michenaud@u-bordeaux.fr

Antoine Blanchard

Univ. Bordeaux, MIA,
Mission Investissements d'avenir,
33000 Bordeaux, France

antoine.blanchard@u-bordeaux.fr

Résumé—*Les habitudes d'apprentissage des étudiants et leurs compétences évoluent. Leurs connaissances technologiques sont réduites. Les orientations actuelles, plus généralistes, associées à des restrictions budgétaires, entraînent une diminution des heures d'enseignement de conception et de fabrication mécanique. L'ensemble de ces facteurs imposent de proposer de nouvelles approches pédagogiques. Les heures attribuées aux enseignements de travaux pratiques sont souvent sacrifiées alors qu'ils sont essentiels à l'apprentissage. Afin de compléter les séances de TP, en présentiel, l'Université de Bordeaux porte le développement d'une plateforme de laboratoire virtuel. Elle est intégrée à Moodle (un L.M.S., Learning Management System) comme une nouvelle activité pour établir un lien avec d'autres activités d'apprentissage de Moodle (cours, tests, etc.) et pour assurer le suivi des élèves. Un premier prototype en développement du laboratoire virtuel est dédié à la métrologie dimensionnelle avec des dispositifs de mesure traditionnels simulés (pied à coulisse, micromètre, comparateur, etc.) et des machines à mesurer tridimensionnelles. La simulation de la métrologie est réalisée dans un environnement 3D et se base sur des modèles de pièces avec des dimensions, des orientations, des erreurs de position et de forme (« skin » modèle) et sur des dispositifs de mesure entachés d'incertitudes de mesure.*

Mots-clés—laboratoire virtuel, e-learning, travaux pratiques, ISO GPS, « skin » modèle

I. INTRODUCTION

A. Préoccupation

À l'université, les enseignements en présentiel ne sont pas toujours perçus à leur juste valeur par les étudiants. Les formes d'enseignement classiques, l'infrastructure, les sollicitations extérieures ou simplement les variations d'attention de l'étudiant peuvent nuire tant à son apprentissage qu'à la motivation de l'enseignant.

De plus, les études scientifiques et technologiques sont basées sur la mise en pratique d'acquis théoriques, à travers la manipulation d'objets et d'instruments. Les travaux pratiques

(T.P.) prévus à cet effet nécessitent un temps privilégié et un lieu donné. Les grands effectifs d'inscrits dans les premières années d'études supérieures universitaires et les limitations matérielles (nombre de salles, de moyens) et humaines rendent délicate l'acquisition des savoirs par la réalisation de T.P. en présentiel.

Face à l'évolution de la capacité d'attention des étudiants, de manque de temps et de moyens pour l'acquisition des savoirs en T.P., une solution envisagée repose sur une stratégie pédagogique intégrant un Learning Management System (L.M.S.) et un laboratoire virtuel (L.V.).

Les activités du laboratoire virtuel doivent permettre en suivant différents scénarios, de préparer à distance des sessions d'enseignement (cours ou T.P.), de consolider les connaissances acquises en présentiel et d'acquérir des connaissances complémentaires.

Différents laboratoires sur ordinateur ont été développés depuis plusieurs années. Parmi ces laboratoires nous pouvons distinguer les laboratoires à distance et les laboratoires purement virtuels.

B. Laboratoires à distance

Le but des laboratoires à distance est de pouvoir mener, à domicile ou n'importe où, des expériences réelles distantes par le biais d'une communication par internet. Les laboratoires à distance sont très bien adaptés aux expériences pour lesquelles les manipulations sont réduites, ainsi ils sont particulièrement développés pour des expériences en électronique [1]. Les mesures sur un circuit électrique nécessitent une courte période d'utilisation du laboratoire à distance, et le laboratoire peut donc enchaîner très rapidement des requêtes d'essais de nombreux étudiants. En mécanique, la flexion d'une poutre [2] est un autre exemple de mesure rapide. D'autres domaines d'application pour les laboratoires éloignés sont l'optique [3] ou la robotique. Les laboratoires à distance peuvent également être

utilisés pour des expériences coûteuses ou des manipulations dangereuses. Si nous voulons un accès distant ouvert à un large public, les expériences doivent donc répondre à deux exigences : elles doivent être automatisées et courtes. Ce n'est pas le cas pour la métrologie dimensionnelle.

C. Laboratoires virtuels

Les Laboratoires Virtuels (L.V.) sont une autre façon de développer des laboratoires en ligne. Ils sont basés sur la simulation des phénomènes physiques en jeu. Les logiciels de simulation sont utilisés depuis longtemps pour l'enseignement. L'intégration réelle des laboratoires virtuels, avec un environnement 3D, qui plus est par internet, est plus récente.

Pour illustrer quelques exemples sont listés : un enrouleur pour l'ingénierie textile est simulé à l'aide de Virtools [4], un microscope virtuel [5] reproduit l'image microscopique d'un matériau, le laboratoire en ligne Labster est bien connu dans le domaine des biotechnologies [6], le laboratoire Trilab pour des expériences de contrôle de processus a été développé avec trois modes d'utilisation (présentiel, à distance ou virtuel) [7]. Potkonjak et al. [8] recense un ensemble de laboratoires virtuels dans le domaine des sciences.

Selon [8], lors du travail dans un L.V., « l'étudiant doit se sentir comme si il travaillait avec des équipements réels dans un environnement réel » avec des équipements identiques au réel, un comportement physique et une visualisation réalistes et des moyens de communication avec l'enseignant et les autres étudiants. Pourtant, l'utilisation des technologies de l'information pour l'éducation conduit principalement à des activités formatées, réduites à des scénarios prédéfinis, qui sont peu nombreux et donc peu représentatifs de la réalité. Le projet présenté par la suite tente de répondre à l'exigence de réalisme sauf sur le critère de la communication et de la collaboration qui n'apas été retenu.

II. PRESENTATION DU PROJET ET DES OBJECTIFS

Cet article présente un projet de l'université de Bordeaux, en phase de développement. Une première partie sera fonctionnelle en juillet 2017. Le public visé est celui des parcours licence et master de Sciences et Technologie avec un grand nombre d'étudiants susceptibles d'être concernés en licence. Il doit enrichir l'offre des supports pédagogiques à distance, et aider et motiver les plus jeunes étudiants dans leur découverte des Sciences et Technologie à l'Université.

Dans un second temps, la plateforme a vocation à être ouverte à l'enseignement secondaire et à la formation continue. La pérennisation du projet passera par un large usage de la plate-forme. Les principes fondateurs sont présentés ci-dessous.

A. Environnement 3D

En considérant que l'environnement informatiquedes étudiants est de plus en plus orienté 3D, le projet est résolument engagé dans cette voie, même si d'un point de vue pédagogique, le 2D est souvent suffisant pour mettre en évidence certains phénomènes. Pour certains T.P. il est tout de même envisagé un environnement 2D afin de simplifier l'interface.

Le contenu 3D du laboratoire virtuel sera celui d'un lieu d'expérimentation. Un ensemble de moyens d'observation et de mesures doit être mis à disposition ainsi que des « corps » (pièces mécaniques, composants optiques, composants électroniques, équipements de chimie...) et des « substances » (matériaux, acides, réactifs, azotes...).

L'étudiant pourra interagir en 3D sur ces objets et substances par des actions : déplacer, soulever, ouvrir, fermer, verser...

B. Procédure expérimentale ouverte

Les T.P. virtuels doivent laisser une part d'initiative à l'étudiant. Il doit avoir une certaine liberté d'action. Les manipulations ne doivent pas être imposées. En fonction de son niveau scientifique et technique, l'étudiant doit conduire les procédures expérimentales comme il l'entend avec les outils et objets mis à disposition par l'enseignant. Il ne doit pas être restreint à un scénario linéaire, prédéfini et formaté.

De son côté, l'enseignant crée un T.P. en proposant des objectifs et un scénario pédagogique sur Moodle et prépare l'environnement 3D du T.P. en sélectionnant les outils (instruments de mesure, d'observation, de manipulation, etc.), et les objets (solides, liquides, gaz, pouvant être mesurés, observés, manipulés) disponibles dans l'interface de l'étudiant.

C. Ouverture disciplinaire

Le laboratoire virtuel a vocation à accueillir toutes sortes de T.P., dans différents domaines de la physique (mécanique, électronique, optique...) mais également d'autres secteurs comme la chimie, et peut-être la biologie

Sa conception modulaire dès la première phase du projet doit permettre d'ajouter ultérieurement de nouveaux objets, outils, comportements... tout en gardant la même plateforme (interface utilisateur, connexion avec le L.M.S., gestion des sessions étudiants et des instances de T.P...). Evidemment, chaque discipline nécessitera le développement de modules spécifiques.

D. Prise en compte des incertitudes

Dans la simulation du réel, les variabilités des paramètres et les incertitudes de mesure ne sont généralement pas prises en compte [4-7]. Pourtant, il s'agit d'un élément essentiel dans l'analyse de résultats expérimentaux dans le cadre de l'activité de T.P. en présentiel.

Une des innovations pédagogique du projet est basée sur la prise en compte de la variabilité des paramètres d'entrée et des incertitudes des moyens de mesure.

E. Intégration dans un L.M.S.

Ce nouveau « laboratoire virtuel » doit être intégré dans un L.M.S. (Learning Management System), Moodle dans un premier temps, et pourra s'interfacer avec les outils pédagogiques existants.

Les outils du L.M.S. sont utilisés pour construire des parcours de formation incluant le laboratoire virtuel selon un séquençement pédagogique adapté. Le scénario du T.P. n'est pas partie intégrante du laboratoire virtuel, il est défini sur

Moodle. Le laboratoire virtuel est vu comme un outil de simulation.

Le L.M.S. permet à l'étudiant de se connecter et d'ouvrir le laboratoire virtuel, de commencer une expérimentation ou d'en continuer une. Le L.M.S. enregistre les données spécifiques de l'étudiant pour un T.P. donné : point d'avancement, résultats de mesure, validation d'étapes, évaluation...

Le laboratoire virtuel doit devenir une activité du L.M.S. à part entière, comme une autre activité pédagogique, mais en mettant en œuvre un environnement de type 3D.

F. Application Web

Pour une utilisation par le plus grand nombre, indépendante du système d'exploitation de l'appareil utilisé le choix s'est porté sur une application web. Si possible, l'application ne doit pas nécessiter l'installation d'un plug-in sur le navigateur avec une solution reposant sur WebGL et javascript. Cependant le respect de ce dernier point n'a pas pu être respecté et l'usage de la plateforme nécessitera le téléchargement d'un « player » sur le navigateur internet.

III. LA PLATE FORME

Sinon, la raison du développement d'un nouveau laboratoire virtuel repose sur le fait que ces principes fondateurs ne sont pas tous présents dans un laboratoire virtuel unique. Parmi ces principes, il est ainsi très rare d'avoir une procédure expérimentale ouverte, des disciplines différentes et la prise en compte des incertitudes. L'objectif du projet est de répondre à ces exigences.

A. Interface étudiant

Afin de concrétiser la notion de laboratoire virtuel, une maquette d'interface graphique étudiant est présentée (fig1).

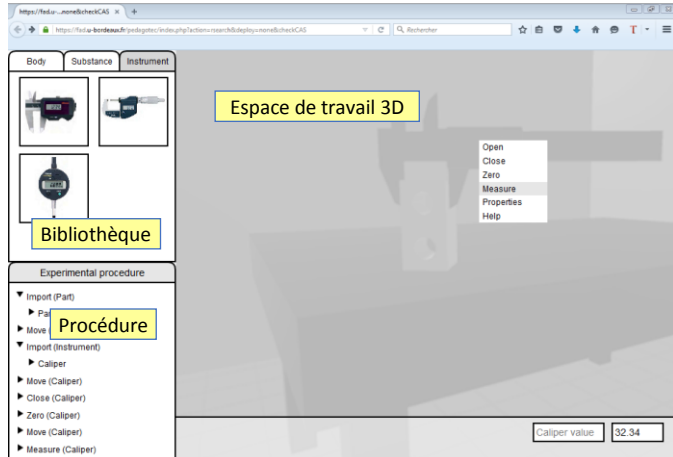


Figure 1. INTERFACE ETUDIANT

La zone principale ou espace de travail est « le laboratoire virtuel », un espace 3D dans lequel les étudiants déposent les différents objets virtuels et les font interagir. L'environnement 3D permet de gérer les effets de la gravité, les collisions, l'écoulement des liquides... C'est le lieu où l'étudiant va réaliser les différentes actions nécessaires à l'expérimentation.

La Bibliothèque située sur le côté gauche est un ensemble de menus dans lesquels l'étudiant pourra sélectionner les objets virtuels. Les visuels associés sont 2D par souci de simplicité. Pour rappel, les objets virtuels sont :

- Les corps : pièce mécanique à mesurer, poutre de flexion, lentille, miroir, prisme, aimant, alimentation électrique, résistance, transistor, circuits intégrés, bécher, pipette, dispositif de chauffage...
- Les substances : aluminium en poudre, acide nitrique, acide sulfurique, soude, glucose...
- Les instruments d'observation et de mesure : pied à coulisse, comparateur, MMT, jauge de déformation, multimètre, oscilloscope, chronomètre, balance, hygromètre, microscope, pHmètre...

Certains objets sont paramétrés : valeur d'une résistance, température de chauffage, réglage d'un oscilloscope... Ces paramètres peuvent être modifiés lors du dépôt de l'objet dans la scène 3D ou en cours de manipulation.

La plate-forme enregistre les actions réalisées, c'est-à-dire la procédure expérimentale en place. La liste des actions s'affiche dans la zone de procédure expérimentale située à gauche de l'interface.

Le premier objectif est de « tracer » l'approche expérimentale afin que l'étudiant puisse la modifier ultérieurement pour corriger ses erreurs, améliorer la procédure ou faire des comparaisons. Le deuxième objectif est de pouvoir « rejouer » une procédure expérimentale. Ceci est essentiel car il permet à l'étudiant de répéter l'expérience plusieurs fois, en tenant compte des incertitudes. Les résultats de la mesure diffèrent selon les incertitudes introduites et des analyses statistiques peuvent être conduites par les étudiants.

B. Simulation

Un point essentiel du laboratoire est la définition et l'intégration des comportements des objets virtuels manipulés et de leurs interactions mutuelles. Deux aspects de la simulation sont à distinguer :

- la simulation 3D pour la visualisation des objets dans l'interface étudiant,
- la simulation pour calculer les valeurs des mesures virtuelles.

La première nécessite une réponse en temps réel sans besoin d'une très bonne précision. Il suffit que le résultat soit acceptable d'un point de vue visuel. Cette simulation s'apparente aux simulations réalisées dans le cadre des jeux 3D et un moteur physique pour jeu est la solution idéale.

La simulation pour la mesure nécessite une très bonne précision mais le calcul peut être plus long (2 secondes maximum) car cette simulation n'est déclenchée que lors de l'action de mesure. Dans ce cas, des modules spécifiques sont développés. Ils doivent modéliser finement les phénomènes en jeu et les incertitudes de mesure. Ces modules sont spécifiques à une discipline (métrologie dimensionnelle, mécanique des structures...).

IV. METROLOGIE VIRTUELLE

Un premier prototype est en cours de développement. Il concerne la métrologie dimensionnelle. Plusieurs applications interactives existent pour la métrologie dimensionnelle [9] et l'étalonnage [10], mais ce ne sont pas des laboratoires virtuels. Trois simulations sont prévues avec trois instruments de mesure différents : pied à coulisse, micromètre et comparateur.

A. Objets

Les objets sont :

- Les instruments de mesure : pied à coulisse, micromètre, comparateur,
- Leurs accessoires : cales étalon, support de comparateur, marbre,
- Les pièces à mesurer.

Pour chaque objet, un modèle 3D est créé et les paramètres et les actions sont identifiés. Les paramètres du pied à coulisse sont donnés dans le tableau 1 et les paramètres des cales étalon dans le tableau 2.


Pied à coulisse	
Paramètres enseignant	<ul style="list-style-type: none"> • Intervalle de mesure (valeur maximale mesurable) • Résolution • Incertitude sur le zéro (écart type de la dispersion) • Incertitude sur le zéro initial (écart type de la dispersion) • Incertitude de la mesure (écart type de la dispersion)
Actions	<ul style="list-style-type: none"> • Déposer • Désactiver la gravité sur le pied à coulisse afin de faciliter la mesure (il peut rester en l'air pour pouvoir le placer facilement sur la pièce) • Ouvrir le pied à coulisse. Arrêt de l'ouverture si l'on atteint la valeur maximale mesurable • De la même manière, fermer le pied à coulisse • Arrêt de la fermeture lorsque les deux becs sont en contact ou lorsqu'un objet "bloque" l'écartement. Lors de l'arrêt, le dispositif doit être orienté normalement aux deux surfaces en contact • Régler le zéro • Relever la mesure

Tableau 1. PARAMETRES ET ACTIONS DU PIED A COULISSE

Cales étalon	
Paramètres enseignant	<ul style="list-style-type: none"> • Liste des longueurs des cales • Incertitude de la longueur des cales (écart type de la dispersion) • Incertitude de l'empilement de deux cales (moyenne + écart type de la dispersion)
Actions	<ul style="list-style-type: none"> • Prendre dans la boîte une cale de taille particulière ou un ensemble de cales en les empilant • Déplacer, Déposer • Ranger un empilement de cales ou une cale dans la boîte

Tableau 2. PARAMETRES ET ACTIONS DES CALES

Les pièces n'ont pas de paramètres et les actions sont réduites à les déplacer et les déposer. Pour gérer la pièce en 3D, un modèle nominal est créé. Cependant, pour prendre en compte l'effet des défauts de forme sur la mesure, une surface non-idéale est également créée à partir du modèle nominal [11-15]. Il s'agit d'un maillage surfacique représentant la pièce avec des défauts de forme. Chaque sommet du maillage a une déviation normale à la surface. La figure 2b présente une surface non-idéale particulière, non réaliste, avec des défauts amplifiés pour être visibles. Si les écarts ne sont pas amplifiés, la différence ne peut pas être perçue à l'œil nu.

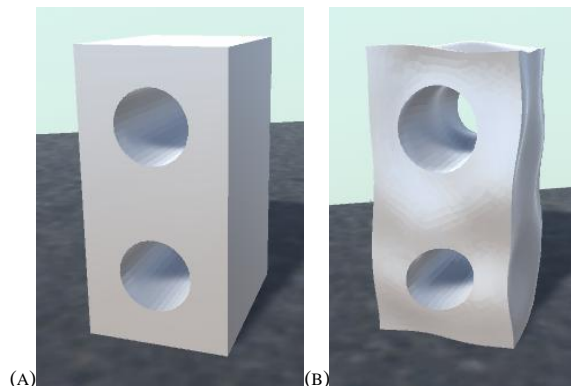


Figure 2. (A) PIECE NOMINALE, (B) « SKIN » MODELE

B. Métrologie virtuelle au pied à coulisse

La figure 3 présente une vue prototype du laboratoire virtuel. Une pièce nominale est mesurée avec un pied à coulisse. Comme décrit ci-dessus, la mesure n'est pas calculée à partir de la scène 3D, mais à partir de la surface non-idéale de la pièce.

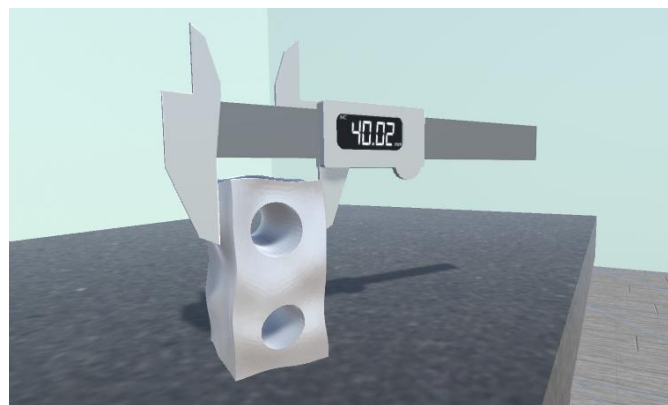


Figure 3. METROLOGIE AU PIED A COULISSE

L'emplacement relatif du pied à coulisse par rapport à la pièce est déterminé à partir de la scène 3D. Pour simuler la mesure, deux plans rectangulaires étroits représentant les surfaces des mâchoires du pied à coulisse sont construits par calcul en les contraignant à être parallèles et en minimisant leur distance relative. La mesure affichée est égale à la distance plan-plan plus des valeurs aléatoires représentant les incertitudes de mesure. Dans un premier temps, les distributions de probabilité des incertitudes seront normales et identifiées par des écarts types (voir tableau 1 : incertitude de mesure sur le zéro et incertitude de mesure).

Au lieu d'utiliser la pièce nominale, la surface non-idéale amplifiée peut être introduite dans la scène (figure 3). Le but est de souligner le rôle des défauts de forme sur la distance mesurée avec le pied à coulisse. Sur la figure, on peut observer un contact ponctuel, au lieu du contact de surface, entre le pied à coulisse et la surface. La simulation accentue les phénomènes impliqués dans la métrologie dimensionnelle de la pièce.

C. Métrologie virtuelle au comparateur

En figure 4, une pièce différente est mesurée avec un comparateur et des cales étalon. Dans ce cas, les écarts sont amplifiés. Comme précédemment, l'emplacement relatif du comparateur par rapport à la pièce est déterminé à partir de la scène 3D.

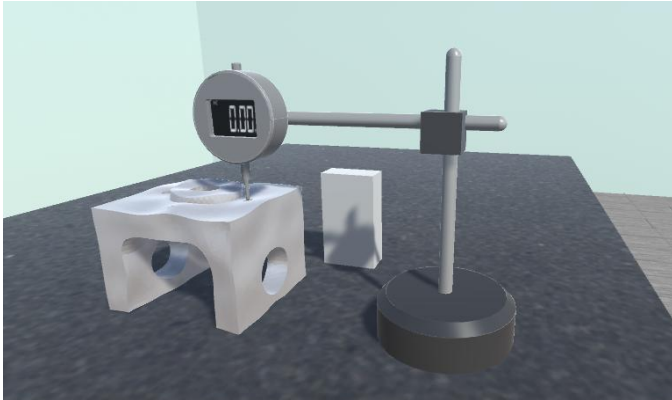


Figure 4. METROLOGIE AU COMPARATEUR

Pour calculer le résultat de la mesure, le contact pièce/marbre est simulé en associant un plan à la surface de la pièce en contact. Le plan est associé en le contraignant à être à l'extérieur à la matière et en minimisant la distance entre le centre de gravité de la pièce et le plan. Selon l'emplacement enregistré du comparateur, le point de contact est déterminé, ainsi que la distance de ce point au plan.

Auparavant, le zéro du comparateur a été réalisé sur un assemblage de cales étalon. La valeur affichée par le comparateur est finalement égale à la différence entre la distance au plan et la hauteur des cales. Des valeurs aléatoires représentant les incertitudes de l'indicateur et de la jauge sont ajoutées.

V. FUTURS DEVELOPPEMENTS POUR LA METROLOGIE

L'objectif est d'ajouter d'autres objets pour offrir un laboratoire plus complet de métrologie dimensionnelle :

- Les instruments de mesure : jauge de profondeur et micromètres internes, colonne de mesure, etc.,
- Les équipements auxiliaires : V, équerre, tablesinus, banc de montage entre pointes, systèmes de fixation, etc.

Mais à l'avenir, l'idée est d'aller au-delà de la métrologie unidimensionnelle, et de proposer de la métrologie tridimensionnelle et de la vérification de spécifications géométriques complexes.

A. Métrologie tridimensionnelle

Tout d'abord, les dispositifs de mesure par coordonnées doivent être introduits dans la scène 3D. Deux principes physiques principaux sont utilisés pour la mesure des coordonnées : mécanique et optique. Les deux technologies sont intéressantes à des fins de formation.

Pour la technologie mécanique, les concepts à mettre en évidence sont : le point mesuré, les systèmes de coordonnées machine et pièce, l'étalonnage du palpeur, le choix des stylets, la position de la pièce, le choix des points de mesure, etc.

Pour la technologie optique, les concepts sont : la position des cibles, l'alignement du maillage 3D, la position de la pièce et le choix des positions du dispositif pour assurer la visibilité des surfaces, etc.

B. Vérification

Une fois les points de mesure enregistrés, les coordonnées des points sont utilisées pour inspecter les spécifications normalisées (figure 5). De nombreux concepts doivent être abordés avec les étudiants : Spécifications ISO GPS, critères d'association, alignement et références, élément géométriques construits, etc.

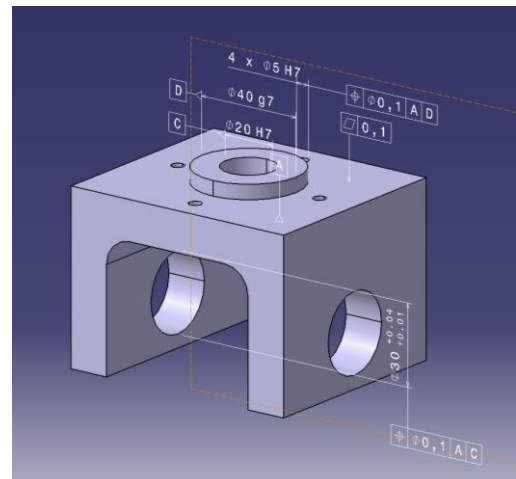


Figure 5. SPECIFICATIONS GEOMETRIQUES (CATIA FTA)

La figure 6 montre les éléments géométriques utilisés pour vérifier l'emplacement du trou $\phi 30$ de la figure 5 : plan de référence et axe de référence, lignes médianes et axe d'une zone de tolérance cylindrique.

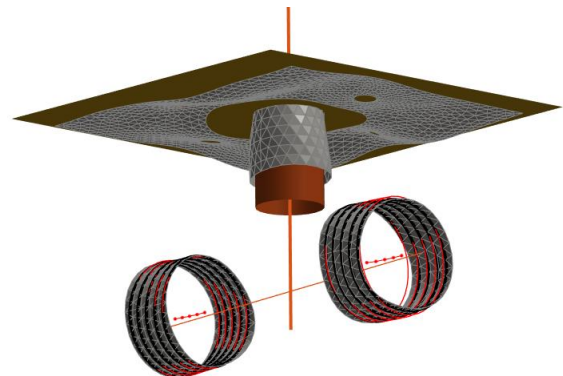


Figure 6. METROLOGIE VIRTUELLE SUR UNE SURFACE NON-IDEALE

C. Intérêt pour l'enseignement

Le laboratoire virtuel proposé peut être complémentaire de projets européens pour l'enseignement de la spécification géométrique des produits [16] [17]. Contrairement aux scénarios prédéfinis créés dans Virtools par Dassault Systèmes [18] ou dans Adobe Flash par Humienny [19], l'étudiant construira et définira la spécification normalisée par lui-même. Il expérimentera la vérification avec différents instruments de mesure. Le laboratoire virtuel en cours d'élaboration proposera une approche active de l'apprentissage GPS.

VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Un projet ambitieux a donc été lancé par l'Université de Bordeaux sur un laboratoire virtuel pour la physique ou les sciences en général et leurs applications technologiques. Le projet est basé sur la simulation 3D dans une application web avec un accès par le L.M.S. de l'établissement pour permettre au laboratoire d'être largement utilisé.

Le premier prototype est en cours de développement pour les enseignements de métrologie dimensionnelle. Les prochaines étapes consisteront à étendre le prototype à la métrologie tridimensionnelle et également à aborder d'autres domaines de la mécanique et de la physique.

L'évaluation des étudiants n'est pas abordée dans cet article en raison de la difficulté à évaluer le travail lorsque différentes solutions peuvent être proposées pour le même objectif. Une façon de procéder à l'évaluation, ou à la validation pour être plus précis, serait de comparer le résultat de l'étudiant à une valeur de référence.

VII. REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé avec le soutien financier de l'Etat français, géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du programme "Investissements d'avenir" IdEx Bordeaux (ANR-10-IDEX-03-02).

Les auteurs tiennent à remercier le CSC (China Scholarship Council) pour le financement d'une bourse de thèse.

VIII. REFERENCES

[1] Alamo J. A., Chang V., Hardison J., Zych D., Hui L. An Online Microelectronics Device Characterization Laboratory with a Circuit-like User Interface. International Conference on Engineering Education. July 21-25 2003, Valencia, Spain

[2] Restivo M. T., Mendes J., Lopes A. M., Silva C. M., and Chouzal F. A Remote Laboratory in Engineering Measurement. IEEE Transactions on industrial electronics, 2009, 56(12):4836-4843

[3] Osten W., Wilke M., Pedrini G. Remote laboratories for optical metrology: from the lab to the cloud. Optical Engineering, 2013, 52(10): 101914, 1-10.

[4] Liu J., Jiang H. Development of a Virtual Winder for Computer-Aided Education Using Virtools. Computer Applications in Engineering Education. 2014; 22(1):120-130.

[5] Dobrzański L.A., Honysz R. Development of the virtual light microscope for a material science virtual laboratory.

Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2007;20(1-2):571-574

[6] Bonde, M., Makransky, G., Wandall, J., Larsen, M. V., Morsing, M., Jarmer, H. Ø., & Sommer, M. Improving biotechnology education through gamified laboratory simulations. Nature Biotechnology, 2014;32(7), 694-697.

[7] Abdulwahed M. Nagy Z. K. Developing the TriLab, a Triple Access Mode (Hands-On, Virtual, Remote) Laboratory, of a Process Control Rig Using LabVIEW and Joomla. Computer Applications in Engineering Education. 2013;21(4):614-626.

[8] Potkonjak V., Gardner M., Callaghan V., Mattila P., Guetl C., Petrović V.M., Jovanović K., Virtual laboratories in science, and engineering: a review, Computers & Education, 2016.

[9] Al-Zahrani F. Web-Based Learning and Training for Virtual Metrology Lab. Journal of Telecommunications, 2010;1(2):42-54.

[10] Gomez E., Caja J., Maresca P., Barajas C., Berzal M. Interactive Dimensional Calibration Via Internet. Computer Applications in Engineering Education. 2013;21(3):387-399.

[11] Zhang, M., Anwer, N., Stockinger, A., Mathieu, L., Wartzack, S. Discrete shape modeling for skin model representation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 2013;227(5):672-680.

[12] Zhang, M., Shi, Z., Mathieu, L., Nabil, A., Yang, J. Geometric product specification of gears: The geospeeling perspective. Procedia CIRP, 2015;27:90-96.

[13] Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., Wartzack, S. Skin model shapes: Offering new potentials for modelling product shape variability. ASME IDETC/CIE 2015, Boston, USA 2015;.

[14] Franciosa, P., Gerbino, S., Patalano, S. Simulation of variational compliant assemblies with shape errors based on morphing mesh approach. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2011;53(1-4):47-61.

[15] Wagersten, O., Lindau, B., Lindkvist, L., Söderberg, R. Using morphing techniques in early variation analysis. Journal of Computing and Information Science in Engineering 2014;14(1):011007.

[16] Geometrical Product Specification Course for Technical Universities, European Commission project Leonardo da Vinci Programme, 1999-2001

[17] Geometrical Product Specification and Verification Toolbox, European Commission project Erasmus+ Programme, 2015-2018

[18] 3D tolerancing based on ASME Y14.41-2003, Dassault Systèmes

[19] Humienny Z.; Berta M.: Using Animations to Support the Understanding of Geometrical Tolerancing Concepts. 11th International Symposium on Measurement and Quality Control 2013, September 11-13, 2013, Electronic Proceedings, Cracow-Kielce, Poland.