



**HAL**  
open science

## “ PVD Virtuel ” : apprentissage des dépôts sous vide par la réalité virtuelle

Aurélien Besnard, Ruding Lou

### ► To cite this version:

Aurélien Besnard, Ruding Lou. “ PVD Virtuel ” : apprentissage des dépôts sous vide par la réalité virtuelle. Colloque S.Mart 2025, GIS S.Mart RAO, May 2025, Vogüé (Ardèche - France), France. <hal-05244981>

**HAL Id: hal-05244981**

**<https://hal.science/hal-05244981v1>**

Submitted on 8 Sep 2025

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



# « PVD Virtuel » : apprentissage des dépôts sous vide par la réalité virtuelle

Aurélien Besnard <sup>a,\*</sup>, Ruding Lou <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Université Marie et Louis Pasteur, SUPMICROTECH, CNRS, institut FEMTO-ST, F-2500 Besançon, France

<sup>b</sup> Arts et Métiers Sciences et Technologies, LISPEN, F-71100 Chalon-sur-Saône, France

\* e-mail : [aurelien.besnard@femto-st.fr](mailto:aurelien.besnard@femto-st.fr)

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. Contexte

Le dépôt PVD, ou Physical Vapor Deposition (dépôt physique en phase vapeur), est un procédé de traitement de surface sous vide. Il consiste à ajouter une fine couche (entre quelques nm et quelques  $\mu\text{m}$ ) de matière sur la surface d'une pièce dans l'objectif d'en modifier les propriétés (tribologiques, mécaniques, électriques, magnétiques, optiques, chimiques, biologiques, etc.) [1].

Le traitement est réalisé dans une enceinte maintenue sous vide grâce à un système de pompage. Il consiste à transporter une vapeur métallique, dans une atmosphère réactive ou non, depuis une ou plusieurs sources vers les substrats (pièces à revêtir) où cette vapeur se condense pour former un film.

Il existe deux types de dépôts physiques sous vide : ceux par évaporation et ceux par pulvérisation cathodique. Dans les deux cas, on retrouve les trois étapes : création de la vapeur, transport, croissance. La différence principale qui permet de les classer ainsi est au niveau de la création de la vapeur.

Le procédé d'évaporation implique de porter le métal jusqu'à son point de fusion pour qu'il s'évapore, via différentes techniques : effet Joule, induction, bombardement électronique, arc électrique. La pression de travail est basse et l'énergie des espèces est globalement faible (sauf pour l'arc).

La pulvérisation cathodique repose sur l'effet mécanique associé à un bombardement ionique. Le flux d'ions est généralement obtenu par un plasma à décharge luminescente ce qui implique une pression de travail plus élevée qu'en évaporation. Les espèces sont également plus énergétiques. Il est à noter le cas particulier de la pulvérisation par faisceau d'ion qui utilise un canon à ions et peut donc travailler à basse pression.

Le projet «PVD Virtuel» se concentre sur la pulvérisation magnétron à plasma, mais peut être élargi aux autres techniques

### 1.2. Problématique

L'illustration pédagogique du PVD présente certaines difficultés. Les concepts et procédés techniques peuvent être abstraits et difficiles à visualiser pour les apprenants. Les équipements utilisés pour le PVD sont souvent complexes et coûteux (pompes, générateurs de puissance, capteurs, actionneurs, etc.). Le PVD implique des phénomènes qui se produisent à l'échelle atomique ou moléculaire et qui ne sont donc pas directement observables à l'œil nu.

Pour surmonter ces difficultés, ce projet propose d'utiliser les technologies numériques immersives et interactives, telle que la Réalité Virtuelle (RV), pour former les professionnels et les étudiants aux techniques de PVD de manière sûre, efficace et interactive. L'application de RV permettra d'explorer et de comprendre les aspects théoriques et pratiques de ce processus, tout en leur offrant une expérience d'apprentissage engageante et accessible.

Le principal défi réside dans la représentation visuelle précise des phénomènes qui se produisent lors du processus de PVD, qui sont normalement invisibles à l'œil nu. Il s'agit de recréer de manière immersive et réaliste des actions telles que l'évaporation de matière, le transport des atomes dans la chambre sous vide, et la condensation sur le substrat, tout en garantissant une expérience de visualisation fidèle au processus réel de PVD.

## 2. ÉTAT DE L'ART

Achuthan *et al.* présentent comment l'utilisation de techniques informatiques, telles que les simulations multimédias améliorées et les animations interactives, peut aider les étudiants à mieux comprendre les phénomènes physiques invisibles [2]. L'étude a été menée auprès des étudiants ingénieurs, et a comparé les résultats d'apprentissage entre l'enseignement traditionnel en classe, les expériences en laboratoire réel et les laboratoires virtuels. Les résultats ont montré que les méthodes traditionnelles présentaient des limites importantes, tandis que l'approche combinant l'enseignement en classe avec les laboratoires virtuels a eu un impact positif sur la compréhension visuelle et conceptuelle des étudiants.

Sotiriou *et al.* montrent comment l'utilisation de la Réalité Augmentée (RA) dans l'éducation scientifique augmente la motivation intrinsèque des étudiants et leur apprentissage cognitif des phénomènes physiques invisibles en science [3]. La combinaison de l'enseignement en classe et de l'approche RA semble avoir un impact significatif sur la compréhension des étudiants.

Les technologies de la Réalité Virtuelle (RV) permettent d'illustrer des phénomènes invisibles à l'œil humain en réalité et de réaliser des expériences scientifiques dans le monde virtuel en science des matériaux [4]. L'immersion virtuelle permet de transporter les apprenants dans le monde de l'infiniment petit, lorsque les phénomènes se produisent à l'échelle atomique. Cela confirme l'intérêt de l'usage de la RV dans le contexte du PVD.

## 3. APPROCHE PROPOSÉE

Dans cet article, une application « PVD Virtuel » pour illustrer et expérimenter le procédé de dépôt par pulvérisation magnétron est présentée [5].

La Figure 1 présente les flux de données disponibles et les interactions entre l'utilisateur et des données, selon les voies usuelles (expérimentale ou numérique) et avec l'application « PVD Virtuel ».

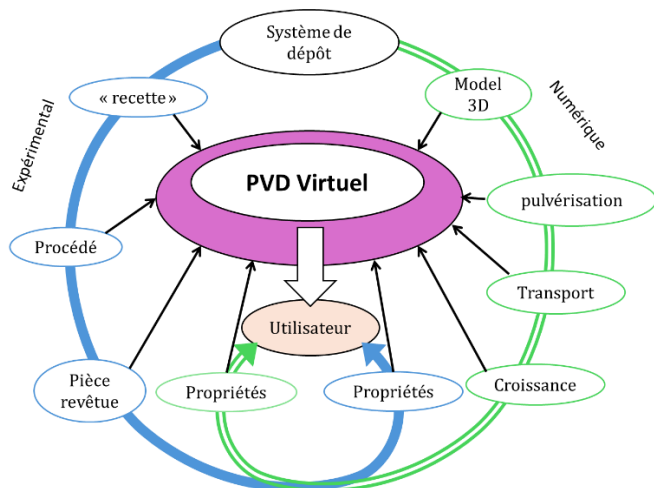


Figure 1 - Interactions entre les données issues de l'expérimental et de simulation numérique et l'utilisateur via l'application « PVD Virtuel ».

La voie expérimentale (trajet bleu sur la Figure 1) est la plus courante : cela part d'un système de dépôt donné et passe séquentiellement par toutes les étapes depuis l'utilisation d'une « recette » jusqu'à l'obtention de la pièce revêtue et sa caractérisation. La voie numérique (trajet vert sur la Figure 1) passe par l'utilisation d'un modèle 3D de la chambre et par des logiciels permettant de simuler séquentiellement les trois étapes du procédé : SRIM [6] pour l'éjection, SIMTRA [7] pour le transport et Virtual Coater© NASCAM [8] pour la croissance et les propriétés des films.

Dans l'une ou l'autre voie (voir dans le meilleur des cas les deux en même temps), l'utilisateur ne va pouvoir traiter qu'une partie des informations produites, en supposant qu'elles soient déjà collectées. La quantité et la nature de ces données font qu'il n'est pas en mesure de tout appréhender. C'est ici qu'intervient l'application « PVD Virtuel » qui se veut une interface entre l'utilisateur et cette masse de données.

Les atouts de la RV pour expérimenter virtuellement le PVD sont d'une part la visualisation de phénomènes physiques invisibles aux yeux et d'autre part l'adaptation multi-échelle de l'avatar (représentation virtuelle) de l'utilisateur et de objets de l'environnement. Les expérimentations, ainsi que les objectifs d'apprentissage, vont concerner différentes échelles (échelle humaine unique vs. multi-échelles) et différents types de formation (technique vs. scientifique). Deux catégories d'univers virtuel ont donc été identifiées dans l'application « PVD Virtuel » : *ex-situ* et *in-situ* (Figure 2).

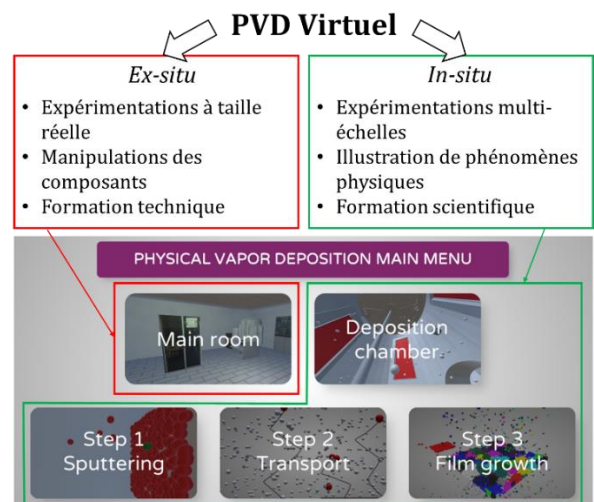


Figure 2 - Menu principal de l'application « PVD Virtuel » avec les deux modules *ex-situ* et *in-situ*.

Le menu principal (Figure 2) présente plusieurs scènes virtuelles : une scène « Main room » pour les expérimentations *ex-situ* et plusieurs scènes pour les différentes étapes du procédé pour les expérimentations *in-situ*.

Dans l'*ex-situ*, il s'agit d'un univers virtuel dont l'échelle correspond à celle de la réalité, telle que l'utilisateur la perçoit. Par exemple, dans une visite virtuelle de l'atelier du procédé PVD, l'espace perçu et la taille des composants virtuels correspondent aux échelles réelles.

Tandis que l'*in-situ* consiste en un univers virtuel dont les échelles des entités sont adaptées afin de permettre une immersion et la visualisation. Par exemple, l'humain ne peut pas accéder réellement à l'intérieur d'une machine de PVD dû à sa petite taille et au vide qui y est maintenu, ou bien l'humain ne peut pas interagir avec les molécules dû à l'incompatibilité d'échelle entre les deux. En RV, la taille de l'avatar sera réduite afin que l'utilisateur puisse entrer et percevoir l'intérieur de la chambre de PVD comme un immense bâtiment. Les molécules virtuelles sont agrandies, de manière telle que l'utilisateur puisse interagir avec elles comme des balles.

#### 4. SOLUTION PROTOTYPEE EX-SITU : CONDITIONS D'USAGE DU SYSTEME

Dans ce module, le paradigme « humain », c'est-à-dire à taille réelle, dans un environnement réaliste et avec des interactions naturelles avec les objets, est choisi. On trouvera deux principaux usages pédagogiques :

- La découverte du système de dépôt dans son laboratoire : cette fonction permet d'identifier et de reconnaître les différents composants et leurs fonctions dans un contexte de vulgarisation et dans la formation scientifique générale en PVD.
- La manipulation de certains composants : cette fonction permet l'apprentissage et l'entraînement de gestes techniques.

##### 4.1. Découverte du système de dépôt

Dans cette scène, l'utilisateur se retrouve dans le laboratoire où est situé le système de dépôt (Figure 3).

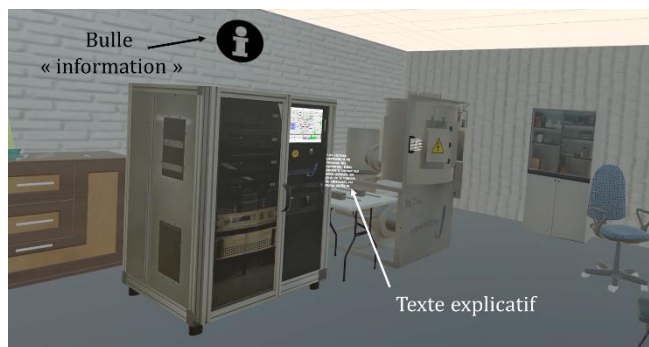


Figure 3 – Le système de dépôt dans son environnement virtuel.

L'utilisateur peut naviguer dans le laboratoire virtuel soit par des déplacements physiques et naturels, soit par la téléportation proposée via les manettes de jeux. Les déplacements physiques sont toutefois limités par l'espace réel où se trouve l'utilisateur.

Des marques (rond noir percé d'un « i » visible en partie en haut de la figure 3) indiquent les endroits où il y a une information à lire. Cela peut être la description d'un composant (les pompes, l'armoire de commande et de puissance, des systèmes d'acquisitions, etc.) ou l'explication d'une action à réaliser (ex. ouvrir la porte).

Cette découverte virtuelle se fait sans risque (électrique, thermique, mécanique), sans nuisance sonore

et sans perturber le système réel (en ouvrant la porte par exemple, ce qui arrêterait le procédé éventuellement en cours et casserait le vide).

##### 4.2. Manipulation de composants du système

En profitant des mêmes avantages que ceux décrits précédemment, l'utilisateur peut se former à des gestes techniques (Figure 4).

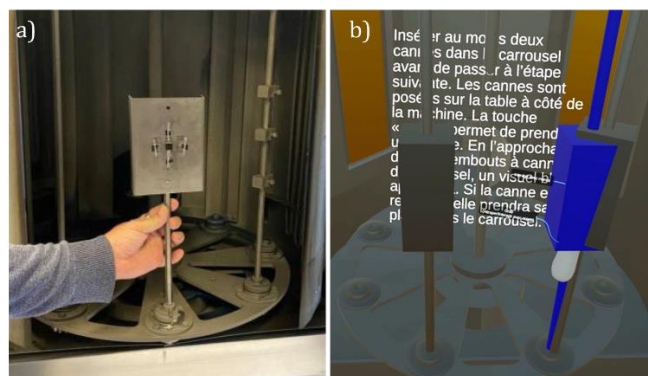


Figure 4 – Installation d'une canne porte-substrats : a) vue du système réel ; b) vue dans l'application « PVD Virtuel ».

Dans l'exemple choisi dans cette première version de l'application « PVD Virtuel », l'utilisateur est invité à mettre en place deux cannes porte-substrats dans le carrousel. L'intérêt de se former à ce geste technique en virtuel est que cela ne demande pas d'intervention directe sur le système réel. Cela permet donc de former sans perturber la production en cours, ou plus simplement de ne pas contaminer le vide de la chambre est remettant à l'atmosphère de manière prolongée. De manière générale, l'application permet des présentations et formations en présentiel et à distance.

#### 5. SOLUTION PROTOTYPEE IN-SITU : IMMERSION MULTI-EHELLES

Dans ce module, le paradigme « humain », c'est-à-dire à taille réelle et dans un environnement réaliste et avec des interactions naturelles avec les objets, est abandonné pour aller dans une immersion-multi échelle. L'utilisateur a, relativement aux dimensions du système réel, des tailles non-réalistes, entre une dizaine de centimètres et quelques centimètres. Il est immergé dans un environnement non-accessible naturellement à l'humain, à savoir le vide, et la gravité n'est pas toujours respecté (il est toujours debout sur une surface horizontale, mais cette surface peut ne pas être physiquement horizontale dans le système réel). Il peut interagir avec des entités physique (molécules, atomes) qui ne sont pas visible à l'œil nu : la dimension de ces entités normalement de l'ordre du nanomètre a été agrandie pour avoir une taille de quelques centimètres relativement à la taille réduite de l'utilisateur). Pour des raisons de visualisation et de puissance de calcul, leur nombre est fortement réduit à une centaine d'unités en même temps.

Ce module permet l'apprentissage des différentes étapes du procédé de dépôt ainsi que des phénomènes physiques s'y produisant :

- Pompage de l'atmosphère initiale,
- Injection de gaz de travail,
- Création du plasma,
- Pulvérisation de la cible,
- Transport vers le substrat,
- Croissance du film,
- Propriétés des films.

Tous ces phénomènes se baseront, à terme, sur des lois physiques et des données issues de l'instrumentation du procédé et des simulations des différentes étapes. A ce stade du développement de l'application « PVD Virtuel », seules quelques données sont issues de ces deux sources, mais la plupart des phénomènes suivent les lois physiques simples intégrées dans l'application. Ce contenu théorique viendra appuyer la visualisation.

### 5.1. Suivi des étapes du procédé

Afin de guider l'utilisateur et de lui permettre de « piloter » le système de dépôt, une tablette peut apparaître sur la manette gauche (Figure 5).

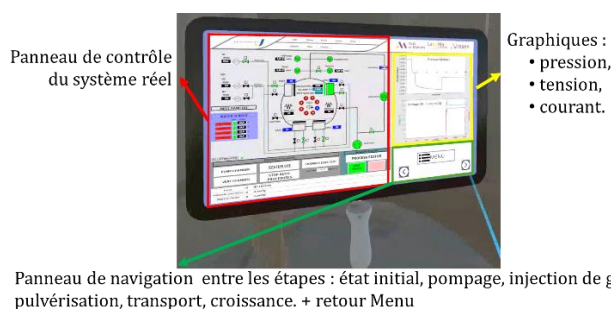


Figure 5 – Tablette de contrôle.

Cette tablette est utilisée comme panneau de contrôle déporté. On y trouve :

- Le panneau de contrôle du système réel avec les différents organes, les paramètres de réglages, les sécurités, etc.
- Des graphiques illustrant les paramètres du procédé en fonction du temps (Pression, tension de décharge, courant). Cette fonctionnalité n'est pas existante dans le panneau de contrôle réel mais permet un suivi plus direct du procédé.
- Un panneau de navigation qui permet de passer d'une étape à une autre et de retourner au menu général (Figure 2).

A chaque étape, les valeurs des paramètres de contrôle, les indicateurs d'états des organes du système et les graphiques changent. Cette tablette est également disponible dans la scène principale du laboratoire.

### 5.2. Visualisation des particules de l'atmosphère

Différentes atmosphères vont être rencontrées au cours du procédé :

- A pression atmosphérique ( $10^5$  Pa), au cours des opérations de chargement et déchargement des

échantillons et dans les premiers moments du pompage, les espèces gazeuses présentes sont celles de l'air (dioxygène  $O_2$ , diazote  $N_2$ , argon Ar, dioxyde de carbone  $CO_2$ , méthane  $CH_4$  et vapeur d'eau  $H_2O$ ).

- Une fois le pompage (primaire puis secondaire) effectué, le vide résiduel ( $10^{-4}$  Pa) est atteint et il ne reste plus que quelques grosses molécules et atomes de gaz.
- Pendant toute la durée du dépôt proprement dit, la pression de travail est de l'ordre de  $10^{-1}$  Pa. L'atmosphère est principalement constituée d'argon (sous formes neutre et ionisé), éventuellement des gaz réactifs ( $O_2$ ,  $N_2$ ) et les espèces métalliques pulvérisées de la cible.

L'atmosphère dans l'enceinte est représentée par des molécules et atomes de gaz, agrandis pour qu'elles soient visibles (Figure 6). De ce fait, leur nombre est fortement réduit et les proportions théoriques ne sont pas respectées afin de visualiser les molécules contaminantes présentes en quelques ppm.

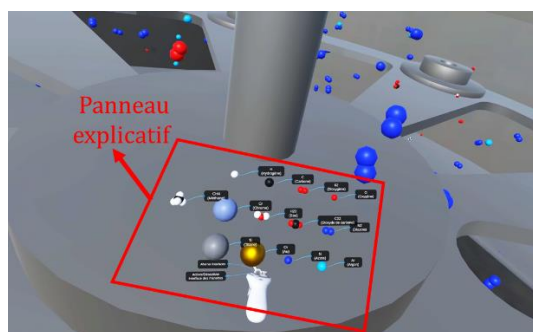


Figure 6 – Molécules et atomes de l'atmosphère et panneau explicatif.

Les molécules de gaz respectent les angles des liaisons ( $180$ ,  $120$  ou  $109.5$  °) [9]. La taille des atomes est en proportion de leur rayon atomique [10]. Le code couleur, basé sur le modèle CPK (Corey-Pauling-Koltun) [11][12], est celui proposé par le logiciel Jmol [13] car il couvre l'intégralité du tableau périodique des éléments.

Les atomes et molécules ont un comportement aléatoire dans l'enceinte avec des collisions élastiques entre eux et avec les parois. Les phénomènes adsorption, désorption, combinaison ne sont pas encore représentés.

Afin d'identifier les atomes et molécules que l'utilisateur voit autour de lui, un panneau explicatif (Figure 6) peut apparaître au-dessus de la manette. Les molécules et atomes sont organisés en grille avec une petite étiquette qui donne leur nom. L'utilisateur peut suivre avec la main la molécule d'intérêt, tout en visualisant les descriptions grâce à la transparence de la grille.

### 5.3. Visualisation du plasma

Le plasma, quatrième état de la matière, est réellement ce qui définit ce procédé de dépôt. C'est pour le créer et le maintenir, qu'il faut travailler au-dessus d'une pression

donnée et qu'il faut appliquer une puissance électrique aux cibles. Il sert à produire les ions qui vont pulvériser les cibles et générer ainsi la vapeur métallique, qui se redéposera sur les substrats. Il peut servir également à nettoyer les substrats et à densifier les couches en croissance. Le plasma est un mélange gazeux, globalement électriquement neutre, constitué d'atomes neutres, d'ions et d'électrons. La déséxcitation des ions émet des photons dont les fréquences sont caractéristiques des éléments impliqués. Afin d'augmenter les vitesses de dépôt, le plasma est confiné par un champ magnétique aux abords des cibles, ce qui lui donne un aspect torique typique.

Dans l'application « PVD Virtuel », deux échelles sont représentées en même temps (Figure 7a).

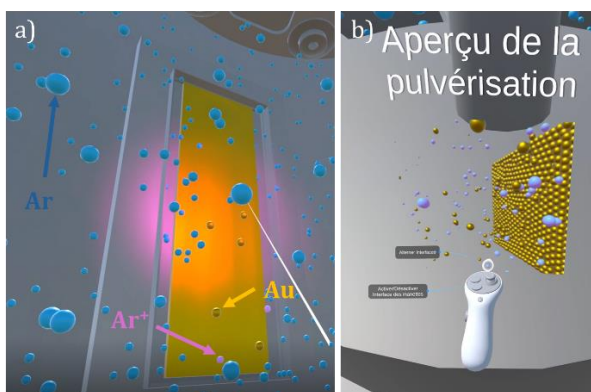


Figure 7 – Visualisation du plasma : a) illustration des espèces impliquées dans un plasma ; b) zoom sur la pulvérisation.

Premièrement, l'utilisateur est dans l'enceinte, à l'étape où il a injecté l'argon pour atteindre la pression de travail, et il visualise les atomes d'argon. Lorsqu'un atome passe dans la zone proche de la surface d'une cible, il est pris par le champ électrique, cède un électron qui en fait un ion  $Ar^+$  et est attiré par la cible polarisée négativement. Sous l'effet des multiples collisions, des atomes de la cible sont éjectés. Ces phénomènes peuvent être visualisés avec un zoom à l'échelle atomique au-dessus de la manette (Figure 7b).

Deuxièmement, une lueur apparaît afin de représenter l'émission photonique. La représentation du plasma de la figure 7a n'est pas réaliste. Une application spécifiquement dédiée au plasma a été développée en tant que module indépendant (Figure 8) [14].

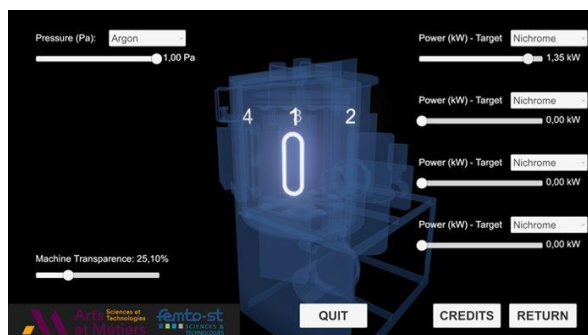


Figure 8 – Application « Plasma ».

Cette application permet de visualiser la couleur et l'intensité de l'émission photonique en fonction de paramètres du procédé : pression de travail, puissance appliquée sur les cibles, nature des espèces (métallique et gazeuse). Ce module sera intégré ultérieurement dans « PVD Virtuel ».

#### 5.4. Visualisation du transport

Pour visualiser le transport, l'utilisateur est transporté en haut d'une des deux cannes porte-substrats qu'il a mis en place initialement (Figure 9).

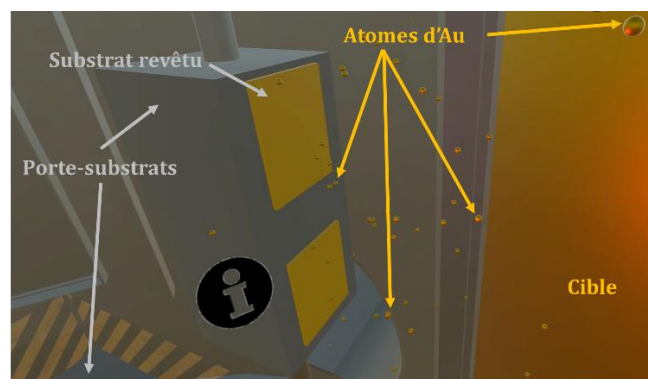


Figure 9 – Visualisation du transport des atomes de la cible au substrat.

Il peut se déplacer sur cette plateforme dans les limites définies par les barrières virtuelles. Cette sécurité est indispensable pour le confort de l'utilisateur, car il se retrouve en altitude et peut être perturbé par le vide qu'il a devant lui.

Depuis cette plateforme, il voit les atomes de métal partir de la cible, changer de trajectoire suite aux collisions et atteindre des surfaces solides (dont celle du substrat).

Progressivement, le substrat change de couleur afin d'illustrer la formation du film.

#### 5.5. Visualisation de la croissance

La dernière scène permet de visualiser la croissance du film sur le substrat à l'échelle atomique (Figure 10a).

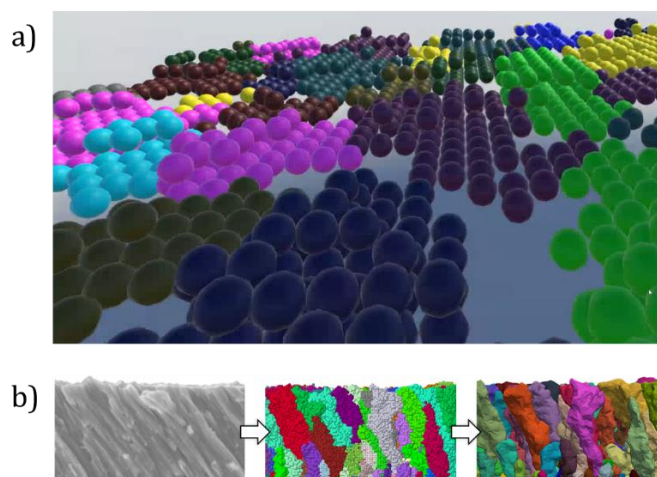


Figure 10 – Croissance du film : a) vue atomique ; b) vue colonnaire [15].

La figure 10a représente le début de la croissance avec la formation des premiers clusters sur le substrat. Dans cette visualisation, les atomes ont tous le même rayon atomique et sont posés selon une grille cubique. Les coordonnées et l'ordre d'arrivée des atomes sont issus de simulation numérique [8]. Les atomes viennent se poser sur le substrat avec une trajectoire rectiligne, en ne représentant que le trajet consécutif à la dernière collision. L'utilisateur peut observer de loin ou venir au milieu des atomes et se laisser immerger par le film en croissance. Il ne peut cependant pas perturber la structure en bougeant les atomes à la main. Les couleurs des atomes représentent les colonnes dont ils font partie.

La microstructure colonnaire du film à la fin du procédé de dépôt peut également être représentée (Figure 10b). Les nuages de points des colonnes entières, issus des clusters, sont individuellement maillés [15] et correspondent à la microstructure réelle. L'utilisation des couleurs sert encore une fois à différencier les colonnes entre elles.

## 6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cet article, une application de réalité virtuelle dédiée au procédé de traitement sous vide PVD a été proposée. Le prototype réalisé comprend deux modalités. Une *ex-situ*, dans le laboratoire de traitement de surface, à taille réelle, et permettant la découverte du procédé et des organes de la machine et des expérimentations de gestes techniques comme la manipulation de la porte ou la mise en place de cannes porte-substrats. La seconde est *in-situ*, et permet de suivre les étapes du procédé en immersion dans un environnement non-accessible à l'humain et multi-échelles. Ces expérimentations permettent de comprendre les phénomènes physiques se produisant tout au long du procédé de dépôt (pompage, visualisation des atomes et molécules, plasma, pulvérisation et croissance). Les données alimentant l'application sont issues de mesures obtenues du système réel ainsi que de simulations numériques. Un travail important reste à réaliser pour intégrer un volume plus conséquent de ces données. Il reste également de nombreux scénarii à développer en termes de formation et d'expérimentations : par exemple, des opérations de maintenance sur les cibles, la visualisation du fonctionnement des technologies de pompes, la visualisation de la distribution du flux de matière, voire des propriétés des films, dans l'enceinte en fonction de paramètres du procédé, la visualisation des caractéristiques des plasmas en fonction des paramètres du dépôt, etc.

Une des perspectives les plus intéressantes de cette solution est l'intégration des flux de données (issues de l'instrumentation expérimentale et de la simulation numérique). Cela permettrait d'intervenir sur le système en ayant l'intégralité des informations nécessaires devant les yeux en surimposition de la réalité dans une version RA de « PVD Virtuel », voire de piloter le système à distance en bénéficiant d'une vision approfondie du procédé.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient tous les étudiants du programme grande école Arts et métiers et du master MTI3D [16] qui ont contribué depuis 2017 à ce projet. Merci à RITM-BFC (ANR-17-NCUN-0003) et au conseil régional Bourgogne Franche-Comté pour le financement du projet REVE - Réalité virtuelle pour l'enseignement en école d'ingénieurs. Merci à la Société Française du Vide [17], qui soutient ce projet et a permis des démonstrations lors de salons et conférences [18].

## RÉFÉRENCES

- [1] Mattox D. (2000). Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. Metal Finishing, 98, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(00\)80350-5](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(00)80350-5)
- [2] Achuthan K., Bose L. S., Francis S., Sreelatha K. S., Sreekala C. O., Nedungadi P. Rama, R. Improving perception of invisible phenomena in undergraduate physics education using ICT. 2nd International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT), 226-231, Bandung, Indonesia, 2014. <https://doi.org/10.1109/ICoICT.2014.6914070>
- [3] Sotiriou S. A., Bogner F. A. Visualizing the Invisible: Augmented Reality as an Innovative Science Education Scheme. Advanced Science Letters; 1:114-122, 2008. <http://dx.doi.org/10.1166/asl.2008.012>
- [4] Bourguet M. -L., Romero-Gonzalez M. Work-In-Progress-Teaching Invisible Phenomena and Virtual Experiments: Immersion or Augmentation? 7<sup>th</sup> International Conference of the Immersive Learning Research Network (iLRN), Eureka, CA, USA, 1-3, 2021. <http://dx.doi.org/10.23919/iLRN52045.2021.9459308>
- [5] <https://labomap.ensam.eu/sputtering-in-virtual-reality-153154.kjsp?RH=1415272191355>
- [6] Ziegler J.F. SRIM-2003. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 219-220:1027-1036 2004. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2004.01.208>
- [7] Van Aeken K., Mahieu S. Depla D. The metal flux from a rotating cylindrical magnetron: a Monte Carlo simulation. J. Phy. D: Appl. Phys. 41:205307 2008. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/20/205307>
- [8] Lucas S., Moskovkin P. Simulation at high temperature of atomic deposition, islands coalescence, Ostwald and inverse Ostwald ripening with a general simple kinetic Monte Carlo code. Thin Solids Films 518:5355-5361 2010. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.04.064>
- [9] <https://chemistrytalk.org/molecular-geometry-and-bond-angles/>
- [10] <https://www.elementschimiques.fr/?fr>
- [11] Corey R. B., Pauling L. Molecular Models of Amino Acids, Peptides, and Proteins. Review of Scientific Instruments, 24(8):621-627, 1953. <https://doi.org/10.1063/1.1770803>
- [12] Koltun W. L. Space filling atomic units and connectors for molecular models. U. S. Patent 3170246, 1965.
- [13] <https://jmol.sourceforge.net/jscolors/>
- [14] <https://labomap.ensam.eu/plasmar-196440.kjsp?RH=1415272191355>
- [15] Watiez N., Besnard A., Moskovkin P., Lou R., Outeiro J., Birembaux H., Lucas S. Finite element mesh generation for nano-scale modeling of tilted columnar thin films for numerical simulation. PLM 2022. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 667:216-226. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-25182-5\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-031-25182-5_22)
- [16] <https://artsetmetiers.fr/fr/ingenierie-numerique>
- [17] <https://www.vide.org/>
- [18] [https://www.vide.org/sfvlink\\_v2t\\_ateliers/](https://www.vide.org/sfvlink_v2t_ateliers/)