

**Dossier scientifique**

**Épreuve orale de mise en perspective didactique  
d'un dossier de recherche**

***Candidat : Nathan HAMZE***

**Concours : Agrégation externe spéciale  
Section : physique - chimie  
Option : chimie  
Session 2023**

***Sommaire :***

<b><i>I) CV et Présentation du parcours .....</i></b>	<b><i>2</i></b>
<b><i>II) Travaux de recherche.....</i></b>	<b><i>4</i></b>
<b><i>III) Activités d'enseignement et valorisation de la recherche.....</i></b>	<b><i>8</i></b>
<b><i>Annexes .....</i></b>	<b><i>11</i></b>

## I) CV et Présentation du parcours

*Nathan HAMZE*

*36 ans*

*Docteur en Chimie des matériaux*

*Enseignant certifié de Physique-Chimie*

*Académie de Lille - Lycée International Montebello 59000 Lille*

### EXPERIENCES PROFESSIONNELLES

<b>Enseignant de Physique-Chimie</b>	<b>Education Nationale, Lille (59)</b>	<b>2016 – Aujourd’hui</b>
--------------------------------------	--	---------------------------

- Elaborer des séquences pédagogiques en conformité avec les bulletins officiels
- Concevoir et animer des activités expérimentales au laboratoire
- Collaborer avec l'équipe éducative, participer aux réunions pédagogiques
- Evaluer les compétences expérimentales des élèves ECE, participer au jury du Grand Oral

<b>Doctorat Chimie des Matériaux</b>	<b>UNIVERSITE DE LILLE (59)</b>	<b>2011 – 2015</b>
--------------------------------------	---------------------------------	--------------------

- Préparer un doctorat CIFRE au laboratoire UMET l'université de Lille
- Elaborer des couches minces d'oxydes métalliques par procédé plasma à pression atmosphérique
- Caractériser la surface des matériaux par des analyses physico-chimiques et microscopiques
- Présenter les travaux de recherche et participer aux congrès

<b>Ingénieur R&amp;D Chimie</b>	<b>ARCELORMITTAL, Isbergues (62)</b>	<b>2010 (6 mois)</b>
---------------------------------	--------------------------------------	----------------------

- Formuler des peintures et des revêtements Antifouling
- Appliquer les revêtements sur acier et tester leur efficacité dans des échangeurs thermiques
- Caractériser les matériaux obtenus : mouillabilité, énergie de surface, rugosité, épaisseur

### FORMATIONS UNIVERSITAIRES

**2011 - 2015**    **Université de Lille - ARC international France (59)**  
Doctorat chimie des matériaux – Section 33 (Mention très honorable)

**2008 - 2010**    **École Nationale Supérieure de Chimie de Lille (59)**  
Master chimie ingénierie de la formulation

**2005-2008**    **Université de Lille (59)**  
Licence Chimie

### ENVIRONNEMENT TECHNIQUE

**Numérique**    Suite Office, Langage de programmation Python, logiciels de simulation scientifique

### COMPETENCES LINGUISTIQUES

**Anglais :**        B2

**Arabe - Libanais :**    Maternel

J'ai démarré en septembre 2005 mes études supérieures de Physique-Chimie à l'université de Lille Nord de France (Campus cité scientifique, 59 Villeneuve d'Ascq). Je me suis orienté en Chimie et j'ai validé ma Licence de Chimie en 2008 puis une maîtrise en chimie parcours sciences de la matière. J'ai ensuite intégré le Master Chimie Ingénierie de la formulation à l'École nationale supérieure de chimie de Lille que j'ai validé en 2010. J'ai acquis des solides formations et compétences expérimentales allant de la chimie générale et analytique, à la chimie organique et macromoléculaire en passant par la formulation des produits et les analyses physico-chimiques associées. Durant ces années de formation, j'ai participé à plusieurs projets comme la formulation des matériaux, des peintures et des produits cosmétiques.

En avril 2010, j'ai réalisé mon stage de fin d'études en occupant le poste d'ingénieur chimiste au laboratoire R&D du Groupe ArcelorMittal basé à Isbergues (62). J'ai formulé des peintures et des revêtements Antifouling, hydrophobes, micrométriques et aptes au contact alimentaire. J'ai appliqué ces revêtements sur des échantillons en acier inoxydable prétraité par polissage mécanique et électrochimique. Des mesures de tension de surface, d'épaisseur de revêtement et de rugosité par microscopie à force atomique (AFM) en collaboration avec l'école nationale supérieure de chimie Lille. Le caractère Antifouling est vérifié à l'échelle semi-pilote dans des échangeurs thermiques en acier inoxydable. J'ai pu réduire l'épaisseur d'encrassement dans les échangeurs en réalisant un revêtement superhydrophobes, résistant et rugueux en téflon (PTFE).

Sous la direction des Professeurs d'université Michel TRAISNEL et Maude JIMENEZ de l'université Lille Nord de France, j'ai démarré en mars 2011 un doctorat en chimie de matériaux dans le cadre d'une bourse CIFRE, fruit d'une collaboration entre l'Université de Lille et le Groupe ARC International (62). J'ai présenté ma soutenance de thèse le 10 mars 2015 et mes travaux de recherche se sont déroulés au sein du laboratoire R&D du groupe ARC International et de l'Unité des Matériaux Et Transformations - UMET de l'université Lille Nord de France. J'ai présenté oralement mes travaux dans des conférences nationales et internationales et pour des raisons de confidentialité de ma thèse CIFRE, j'ai publié un article scientifique avec l'accord d'ARC International et je ne pourrai pas publier d'autres articles de mes travaux de recherche avant le 10 mars 2025.

Après un séjour linguistique en Angleterre, j'ai démarré en septembre 2016 ma carrière dans l'enseignement secondaire au sein de l'Éducation nationale, j'ai été affecté à l'académie Lille pour enseigner la physique-chimie au lycée International Montebello à Lille. J'ai suivi plusieurs formations pédagogiques animées par les inspecteurs et des collègues, ce qui me permet de bien gérer mes classes, de réussir mes séquences pédagogiques et mieux évaluer les compétences de mes élèves.

#### Publications :

*HAMZE et al., Influence of processing gases on the properties of cold atmospheric plasma SiOx/Cy coatings, Applied Surface Science, 315, 2014, pages 531-537*

#### Congrès :

- *Communication orale : Influence of type of gas on the properties of SiOx coatings by cold atmospheric plasma, IVC19 congress, Paris, France, Sep 2013*

- *Communication par affiche : Influence of type of gas on the properties of SiOx coatings by cold atmospheric plasma, 2013 IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conference, San Francisco, Etats-Unis d'Amérique, Juin 2013*

- *Communication orale : Mise en évidence de la compétition entre les effets de la rugosité et de l'énergie de surface dans les phénomènes d'encrassement de conduites en acier inoxydable, SFGP 2011, Lille, France, Novembre 2011*

## II) Travaux de recherche :

Le Groupe verrier ARC International basé à Arques (62) investit considérablement dans la recherche et le développement de nouveaux produits verriers ainsi que dans les traitements physico-chimiques et mécaniques du verre pour améliorer son aspect et ses propriétés. Les ingénieurs de recherche mènent leurs projets de recherche en collaboration avec les laboratoires des universités de la région Hauts-de-France. Dans ce cadre, le projet Atmosverre est né en 2010 en collaboration avec le laboratoire UMET spécialisé dans les matériaux, les revêtements et les traitements de surfaces et la société AcXys Technologies, visant l'amélioration des propriétés surfaciques du verre pour lui conférer des fonctionnalités toujours plus performantes : l'objectif était de développer une nouvelle technique de traitement de surface et de dépôt de couches minces, le plasma froid à pression atmosphérique, mis au point par Acxys Technologies. Cette technologie moderne est une alternative possible aux actuels traitements de surface du verre, tant du point de vue économique qu'écologique.

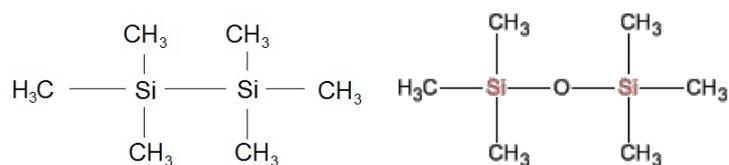
J'ai intégré ce projet dans le cadre de ma thèse de doctorat intitulée "*Dépôt d'oxydes métalliques sur verre par plasma froid à pression atmosphérique*". J'ai réalisé des dépôts d'oxydes sur le verre par un procédé plasma froid à pression atmosphérique Ultra Light System - ULS d'AcXys Technologies (Annexe 1), en utilisant des précurseurs organométalliques à base de silicium Si et d'étain Sn, afin (i) d'améliorer la résistance mécanique de verres sodocalciques à paroi mince en réalisant un dépôt d'oxyde sur le verre, (ii) de limiter la corrosion de surface de verres fluorosilicates en déposant une couche d'oxyde nanométrique (iii) de déposer une couche d'oxyde d'étain SnO<sub>2</sub> uniforme visuellement transparente pour trouver une alternative écologique au procédé de dépôt à chaud de SnO<sub>2</sub> utilisé chez Arc International, qui utilise un précurseur toxique. Tous ces dépôts ne devront pas altérer la surface en termes de brillance et de transparence.

Le plasma froid à pression atmosphérique ULS, est un type de plasma qui peut être généré à des pressions proches de la pression atmosphérique normale et à une température extérieure inférieure à 250°C. Contrairement aux plasmas PECVD, qui nécessitent des conditions de vide élevées, les plasmas froids à pression atmosphérique peuvent être générés à l'air libre et sont donc plus pratiques pour une utilisation industrielle. Le faisceau plasma est généré en appliquant une tension électrique à un gaz à pression atmosphérique, tel que l'air ou l'azote. La décharge électrique ionise le gaz, créant un plasma, un état métastable de la matière, hors équilibre thermodynamique sous forme ionisée.

Compte tenu du fait que le verre est un matériau amorphe, il n'est pas un corps compact plein mais présente de nombreuses discontinuités qu'on appelle les défauts volumiques. Ces défauts sont cependant pratiquement négligeables devant les défauts dits surfaciques présents sur le verre sous la forme de microrayures et de microfissures. On compte plusieurs milliers de ces défauts par centimètre carré de surface. Plus le verre est de faible épaisseur, de l'ordre de quelques millimètres, plus ces défauts vont influencer sa solidité : par exemple, les verres à paroi mince possédant de grandes surfaces par rapport à leurs volumes, les sollicitations mécaniques les endommagent facilement, ce qui les rend très fragiles par rapport aux autres verres de volume plus important.

L'Hexaméthylsilane HMDS et l'Hexaméthylsiloxane HMDSO ont été sélectionnés comme précurseurs de dépôt SiO<sub>x</sub> afin de recouvrir les défauts surfaciques du verre et améliorer ainsi sa résistance à la rupture. L'HMDS est déjà utilisé par le fournisseur (AcXys) qui le dépose par plasma ULS. Les dépôts obtenus étant transparents pour certaines conditions de dépôt, notre but est de caractériser et optimiser ces dépôts dans le but d'augmenter la résistance mécanique du verre. Le second précurseur, l'HMDSO, est

couramment cité dans la littérature et peut être déposé avec plusieurs types de plasma, y compris le plasma ULS. Sa formule chimique est très proche de celle de l'HMDS, c'est pourquoi nous utiliserons les paramètres optimisés pour ce dernier afin d'obtenir un dépôt  $\text{SiO}_x$ . Un des avantages de l'HMDSO (0,06 €/ml) est qu'il est nettement moins cher que l'HMDS (2,5 €/ml), ce qui rend son dépôt à l'échelle industrielle plus économique.



Formules chimiques de l'HMDS (gauche) et de l'HMDSO (droite)

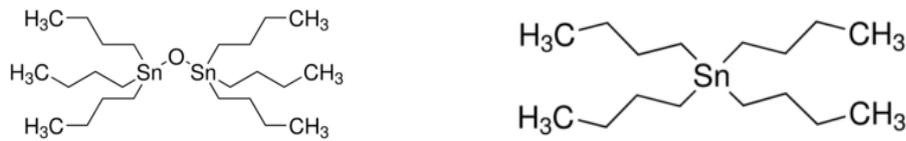
Ces deux précurseurs sont liquides à température ambiante et ont une pression de vapeur saturante élevée. Dans ces conditions, la formation de microgouttelettes pour ces deux liquides est possible par nébulisation en utilisant un système de bulleur mis au point au laboratoire, avec le diazote inerte comme gaz porteur et montre une bonne nébulisation des précurseurs organosiloxanes. Il fonctionne uniquement avec des liquides de pression de vapeur saturante élevée.

Après optimisation des conditions expérimentales : vitesse de balayage, distance buse-substrat, débit de précurseur et le nombre de passages du faisceau sur le substrat, les 2 précurseurs se déposent sous forme d'une fine couche transparente de  $\text{SiO}_x$  d'après les analyses par spectrométrie photoélectronique X – XPS (Annexe 2), ils ont un taux de croissance proche de 30 nm (mesuré par un profilomètre optique) par passage du faisceau plasma chargé en précurseur, la transparence de ces dépôts est limitée à 3 passages, équivalent à une épaisseur maximale < 100 nm. Une grande partie du  $\text{SiO}_x$  déposé est sous forme de  $\text{SiO}_2$  et le reste sous forme de  $-\text{CH}_3\text{SiO}_3$  ; ce dernier confère au dépôt un caractère hydrophobe en présence du carbone par mesure d'angle de contact avec l'eau proche de  $90^\circ$  en utilisant le goniomètre. L'influence du gaz plasmagène (Air ou Diazote) est très importante, les dépôts effectués en utilisant l'air sont plus denses et moins hydrophobes que ceux déposés grâce à l'azote. Le dioxygène de l'air joue le rôle de catalyseur et fragmente les précurseurs en petites particules dans le plasma confirmé par microscopie à force atomique AFM (Annexe 3), ce qui a permis de réduire la rugosité de surface du dépôt  $\text{SiO}_x$  en présence du dioxygène de l'air dans le plasma.

Des substrats minces en verre sodocalcique ont été revêtus par ces couches minces de  $\text{SiO}_x$  transparents, ils ont ensuite subi des tests de traction 3 points afin de déterminer leur force à la rupture  $F_r$  (Newton). Le renforcement mécanique du verre par ces dépôts  $\text{SiO}_x$  a été difficile. Plusieurs paramètres peuvent être à l'origine de ces difficultés mais c'est surtout l'épaisseur très faible de ces dépôts par rapport aux dépôts obtenus par sol-gel et autres procédés. Cette dernière différence est à mon avis la principale responsable de l'échec de mes dépôts par plasma atmosphérique, le verre présentant un nombre important de fissures de taille micrométrique qui sont trop importantes pour être comblées par nos dépôts d'épaisseur maximale de 100 nm. Une augmentation d'épaisseur du dépôt  $\text{SiO}_x$  par plasma ULS tout en conservant une bonne transparence serait avantageuse pour renforcer les verres minces. Le dopage de ce dépôt par l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pourrait également être une possibilité, voire le dépôt d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  seul, cet oxyde possédant de bonnes propriétés mécaniques.

J'ai réussi à déposer une couche mince d'oxyde d'étain  $\text{SnO}_2$  par plasma ULS et ce qui représente une avancée avec ce procédé et pour le plasma froid à pression atmosphérique en générale. L'injection de précurseurs non chlorés dans le plasma était la première

difficulté, l'utilisation du débitmètre régulateur et des nébuliseurs Mira-Mist/Ari-Mist (Annexe 4) nous a permis de nébuliser le TétraButylEtain TBT et l'Oxyde de bis(TriButylEtain) TBTO à faible débit et directement dans le plasma.

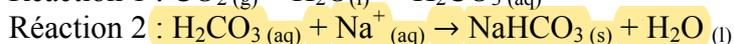
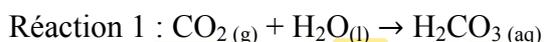


Formules chimiques des : TBTO (gauche) et TBT (droite)

Le TBTO n'est pas un choix adéquat pour le plasma ULS à cause de sa faible dissociation, il y a plus de chaînes carbonées et aussi des liaisons Sn-O par rapport au TBT qui est à l'inverse très réactif et a tendance à former des dépôts opaques (poudreux) à la surface du verre. L'obtention d'une couche mince transparente par la baisse de puissance, la réduction du temps de vol en diminuant les distances substrat-plasma et plasma-nébuliseur n'ont pas limité cette réactivité. La dilution du TBT dans le solvant apolaire Tétrahydrofurane THF a été le challenge dans ces travaux ; je suis parvenu à obtenir des dépôts SnO<sub>2</sub> transparents, homogènes quand on éloigne le plasma du substrat de plus de 1,5 cm, adhérents, légèrement hydrophiles (angle de contact avec l'eau autour de 60°) et épais par rapport au dépôt à chaud (50 à 100 nm). Les analyses par la spectrométrie de fluorescence X ont montré que ces sont bien des dépôts SnO<sub>2</sub> obtenus avec des teneurs qui dépassent largement la teneur des dépôts à chaud industriels d'Arc International. Les études de l'influence du pourcentage de TBT dans le THF ainsi que du débit seraient intéressantes afin de vérifier leurs effets sur l'épaisseur, l'hydrophilie/ hydrophobie de surface et les teneurs en SnO<sub>2</sub>. Comme pour le dépôt SiO<sub>x</sub>, les couches d'oxyde d'étain n'ont pas renforcé les propriétés mécaniques du verre sodocalcique en les analysant par le test de flexion mécanique.

Les couches de SnO<sub>2</sub> réalisées industriellement ont aussi pour objectif de limiter le phénomène apparaissant à la surface du verre lors de son stockage, phénomène appelé « sudation ». Ayant réussi à obtenir un dépôt de type SnO<sub>2</sub> par plasma ULS, ce dépôt est déposé sur des substrats en verre, qui « suent » beaucoup, afin d'évaluer son effet barrière à la sudation. Une autre piste envisagée pour limiter la sudation étant le dépôt de couches organosilicées SiO<sub>x</sub> développées précédemment.

Pour comprendre ce phénomène de sudation observé surtout avec le verre fluorosilicate, un verre blanc opale utilisé pour fabriquer des assiettes, les résultats d'analyses de surface du verre par la microsonde électronique ont montré la présence des poudres humides composée essentiellement du bicarbonate de sodium (ou hydrogénocarbonate de sodium) de formule NaHCO<sub>3</sub>. Ce phénomène n'est pas observé à la surface du verre sodocalcique transparent. En effet, le fluor F électronégatif présent dans les verres fluorosilicates rend les ions sodium Na<sup>+</sup> très mobile. La migration du Na<sup>+</sup> vers la surface des assiettes en verre fluorosilicate est à l'origine du phénomène dit « de sudation » lors de leur stockage plusieurs mois. La sudation se traduit par la formation de voiles blanchâtres de bicarbonate de sodium, qui est le produit de la réaction de Na<sup>+</sup> avec l'eau et le CO<sub>2</sub> de l'air à la surface du verre dont les équations chimiques sont les suivantes :



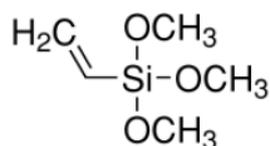
Il faut donc limiter voire supprimer la présence de sodium à la surface, et pour ce faire empêcher la migration de cet élément hors du verre fluorosilicate en appliquant une couche

barrière mince d'oxyde métallique par notre procédé ULS. Les dépôts  $\text{SiO}_x$  et  $\text{SnO}_2$  ont été appliqués sur des substrats de verre fluorosilicate, ils sont ensuite stockés plusieurs mois à ARC International puis ils sont analysés macro et microscopiquement.

Les substrats sont observés à l'aide d'un microscope optique, des peintures de décoration sont appliquées sur leurs surfaces pour évaluer l'adhérence par un test de lavage industriel. La migration des ions  $\text{Na}^+$  dans l'assiette et dans le dépôt est suivie à l'échelle microscopique par des analyses de spectrométrie de masse à ions secondaires à temps de vol TOF-SIMS (Annexe 5) afin d'évaluer l'effet barrière des couches  $\text{SiO}_x$  et  $\text{SnO}_2$ .

Le dépôt  $\text{SiO}_x$  est relativement peu efficace à différentes épaisseurs  $< 100$  nm, le sodium continue à migrer durant le stockage et forme les voiles blanchâtres. Cette efficacité augmente lorsqu'un dépôt  $\text{SnO}_2$  est déposé sur l'assiette. Mais ces revêtements sont hydrophobes, les décors n'ont pas bien adhéré sur ces assiettes après plusieurs cycles de lavage, les assiettes étant destinées à être lavées un certain nombre de fois au cours de leur durée de vie.

Le développement d'un autre procédé plasma à base du précurseur liquide Vinyltriméthoxysilane VTMO a permis de déposer, après optimisation des paramètres expérimentaux, un revêtement transparent et hydrophile (Angle de contact avec l'eau  $< 20^\circ$ ) d'épaisseur nanométrique  $< 100$  nm.



*Formule chimique du VTMO*

Cette couche a montré une efficacité importante contre la migration de  $\text{Na}^+$  seul ou en présence d'une sous-couche de  $\text{SnO}_2$ . L'hypothèse est que ce dépôt est plus dense que les dépôts  $\text{SiO}_x$  précédents, confirmée par les analyses XPS (Annexe 2) montrant que la couche est formée essentiellement de  $\text{SiO}_2$  et  $\text{SiOH}$  ce qui justifie sa surface hydrophile, en effet la molécule du VTMO contient moins des chaînes carbonées par rapport aux HMDS et HMSDO. Après analyses par TOF-SIMS (Annexe 5), les ions  $\text{Na}^+$  migrent moins vers la surface après plusieurs mois de stockage. L'adhésion de décors sur ce revêtement  $\text{SiO}_2$  mais également la tenue de ces mêmes décors après des cycles de lavage au lave-vaisselle ont répondu à 50% des attentes industrielles d'ARC international.

Pour conclure, mes travaux de recherche ont permis d'élaborer, d'optimiser et de contrôler des couches minces par un procédé innovant, le plasma froid à pression atmosphérique, présentant des avantages industriels en réalisant des revêtements en continue sans utiliser des solvants ou bien réaliser le vide dans une enceinte. L'industriel pourrait intégrer ce procédé dans sa ligne de production afin de ne pas perturber la cadence de sa production. Les travaux de recherche ne conduisent pas toujours à une solution efficace, ce qui engendrerait des perspectives. Le dépôt de  $\text{SnO}_2$  par ce procédé est un succès pour remplacer le dépôt à chaud polluant et utilisant des produits chlorés, Il reste à optimiser les couches barrières élaborées pour mieux accrocher les revêtements industriels, en jouant notamment sur sa rugosité. Des prétraitements mécaniques ou chimiques sont potentiellement bénéfiques pour améliorer l'adhérence des revêtements élaborés au substrat verrier.

Techniquement, j'ai utilisé ou exploité des procédés et des techniques d'analyses innovants, ils m'ont permis d'approfondir mes connaissances théoriques à l'aide des dispositifs et des données expérimentales, de relier les propriétés macroscopiques à la composition microscopique des matériaux élaborés, de vulgariser mes travaux à travers des présentations en interne comme en externe, sans oublier les défis rencontrés durant mes travaux.

### **III) Activités d'enseignement et valorisation de la recherche**

J'ai débuté en 2016 ma carrière de professeur en tant qu'enseignant contractuel de physique-chimie. J'ai réussi le concours du CAPES-Physique-Chimie en 2020, j'exerce actuellement ma fonction de Professeur certifié au Lycée International Montebello à Lille, dans le département du Nord. Ce lycée se situe dans le quartier cosmopolite de Wazemmes et accueille 1450 élèves et étudiants dans un cadre international et très agréable. Les élèves sont répartis entre l'enseignement général et technologique. L'établissement offre 4 sections internationales, une section binationale Bachibac et 8 sections européennes, il comporte également dans son enceinte 2 classes des BTS.

J'enseigne la physique-chimie en classe de Seconde, les spécialités physique-chimie et l'enseignement scientifique en cycle terminal de la voie générale. Je prépare et j'anime des séquences pédagogiques comportant des activités documentaires, numériques et expérimentales pour répondre aux exigences du Bulletin Officiel. Les élèves accueillis proviennent de différents secteurs de Lille et des communes limitrophes, ce public hétérogène crée une diversité importante au lycée. Construire, mettre en œuvre et animer des situations d'enseignement et d'apprentissage prennent en compte la diversité de mes élèves.

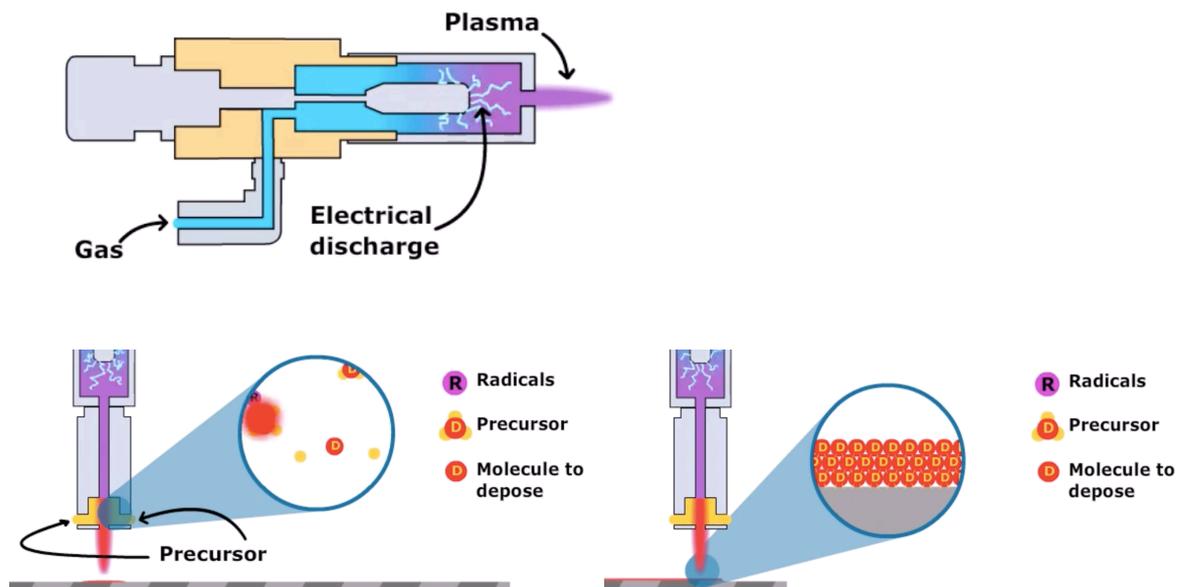
Les difficultés diagnostiquées sont différentes, les compétences et les connaissances sont hétérogènes, des élèves ne prennent pas d'initiatives pour résoudre une situation par manque de motivation et ou bien par peur d'échouer, plusieurs élèves n'arrivent pas à choisir et valoriser leur propre raisonnement. Mon approche pédagogique est basée sur l'expérience, comprendre un phénomène commence par l'observation suivie par l'analyse et l'interprétation sans oublier la modélisation. Je diversifie les activités pour faire travailler des différentes compétences répondant aux consignes du Bulletin Officiel. Au laboratoire, je porte beaucoup d'attention sur la favorisation de l'autonomie de mes élèves pendant les activités expérimentales, ce qui n'est pas facile en classe. Je m'appuie aussi sur la différenciation pour pouvoir me situer au niveau de chaque élève.

En valorisant les travaux de recherche dans l'enseignement, mes élèves développent leur curiosité intellectuelle, leur esprit critique et leur capacité à résoudre des problèmes. Les procédés et les techniques utilisés durant ma thèse sont très avancés, il m'est difficile de les exploiter dans l'enseignement secondaire mais peuvent être extrêmement bénéfique dans l'enseignement supérieur, car cela permet d'intégrer les connaissances et les avancées les plus récentes dans les programmes d'études. Or j'exploite les résultats obtenus, par exemple, je propose une activité documentaire en classe de seconde pour déterminer la taille d'un atome, en exploitant des images reconstruites obtenues par les microscopies électroniques. L'élève observe plusieurs atomes bien ordonnés en deux dimensions et calcule un diamètre moyen en se basant sur l'échelle de l'image reconstruite. Cette activité est intéressante car elle donne une vision générale de la matière à l'échelle microscopique et ne prend pas en compte un seul atome isolé dans l'espace. Pratiquement, je m'appuie sur mon expérience de chercheur dans la recherche bibliographique et le choix de références pour aider mes élèves à bien mener leurs projets du Grand Oral. J'organise aussi des visites

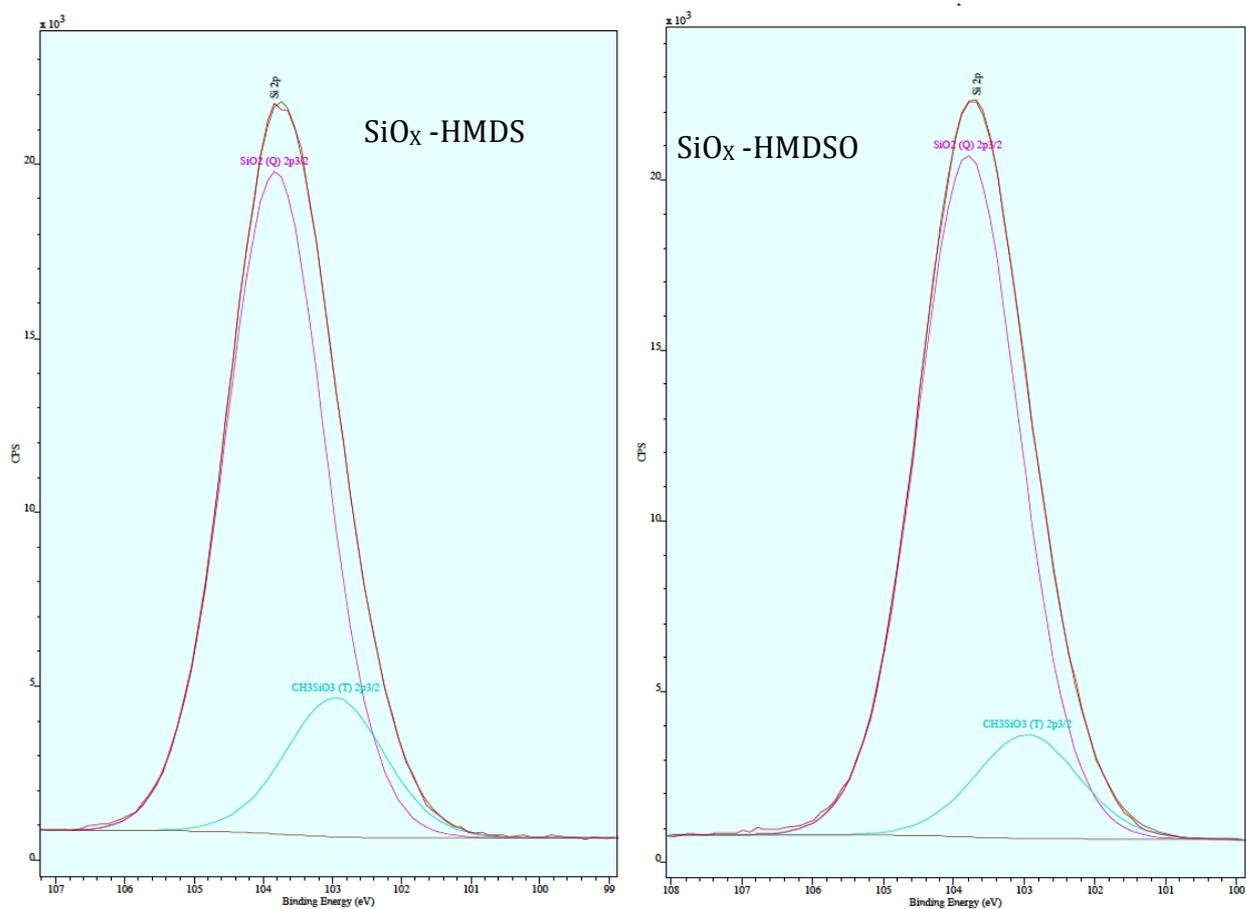
de laboratoires académiques aux élèves de spécialité Physique-chimie, leur offrant une expérience pratique de la recherche et une exposition à des environnements de recherche.

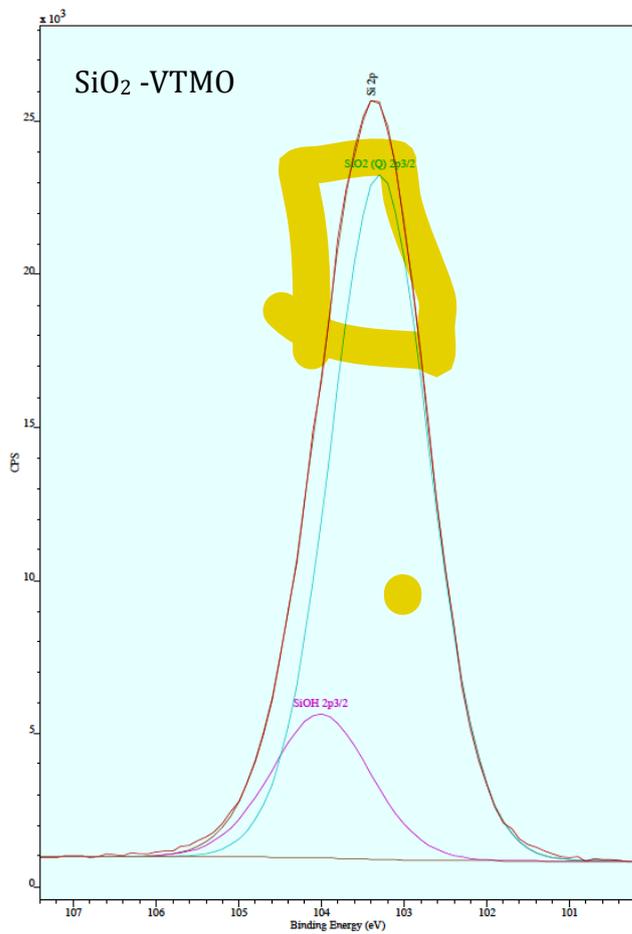
Pour conclure, en intégrant les travaux de recherche dans l'enseignement aide les étudiants et les élèves à comprendre les concepts plus en profondeur, à rester à jour avec les connaissances en actualisant les contenus, cela permet de voir comment les connaissances évoluent et s'appliquent dans le monde réel et à développer une passion pour la recherche scientifique. Encouragez les étudiants à examiner les travaux de recherche et à évaluer la méthodologie, les résultats et les conclusions, les étudiants peuvent développer leur esprit critique et leur capacité à remettre en question les informations présentées.

**Annexe 1: Dépôt par Plasma froid à pression atmosphérique ULS (*images Acyxys Technologies*)**

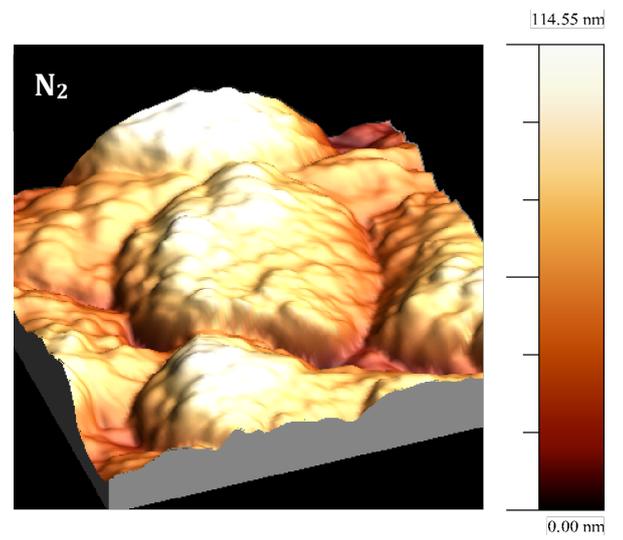
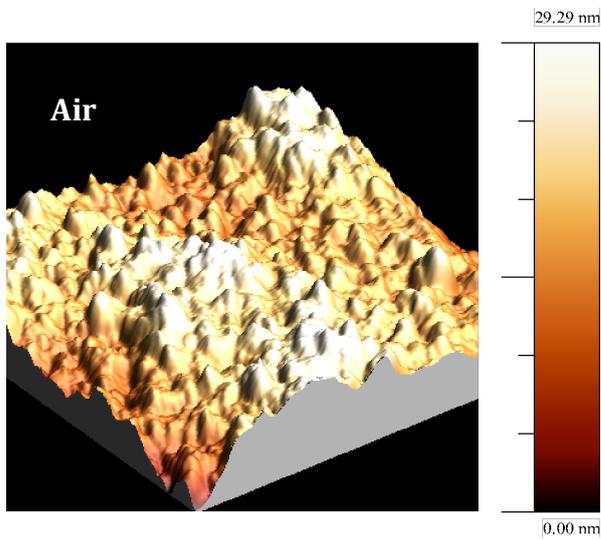


**Annexe 2 : Décompositions du pic Si 2p obtenues par analyses XPS des couches SiO<sub>x</sub> obtenues par les précurseurs HMDS et HMDSO et la couche SiO<sub>2</sub> obtenue par le précurseur VTMO**



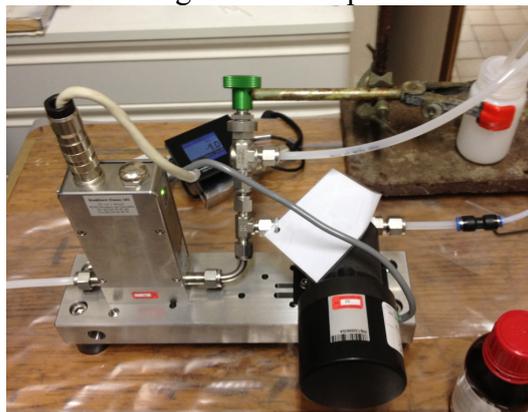


**Annexe 3 : Images reconstruites par AFM 3D (500\*500 nm<sup>2</sup>) des couches SiO<sub>x</sub> (Précurseur HMSD) en fonction du gaz plasmagène**

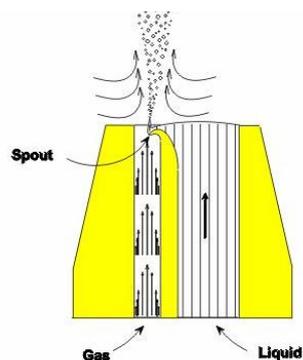


## Annexe 4: Nébuliseur et Débitmètre régulateur utilisés pour nébuliser des volumes trop faibles de précurseur (débit de quelques centaines de $\mu\text{l}/\text{min}$ )

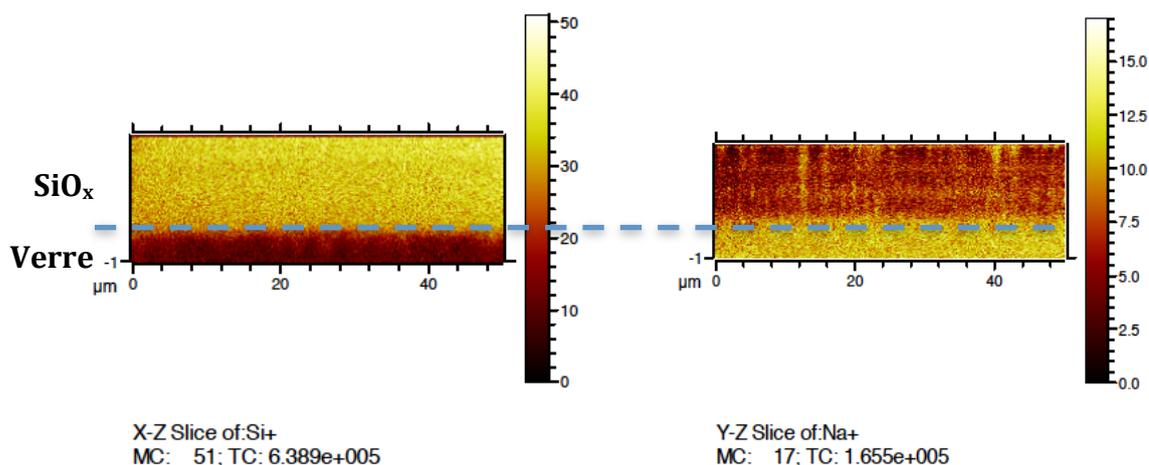
Débitmètre régulateur à trop faible débit



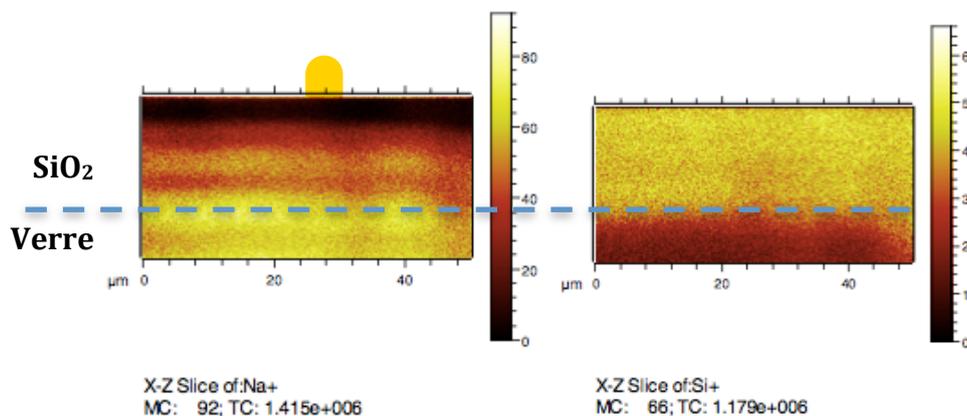
Nébuliseur Ari-Mist



## Annexe 5 : Images ToF-Sims du dépôt $\text{SiO}_2$ (VTMO) et $\text{SiO}_x$ (HMDS) en coupe XZ – Suivi des ions $\text{Na}^+$ dans les couches minces pendant le stockage



Après 1 mois de stockage



Après 4 mois stockage