

# Mutualisation multi-établissement : une solution pour l'enseignement pratique des micro/nanotechnologies

Franck Chollet<sup>1\*</sup>, Virginie Blondeau-Patissier<sup>2</sup>, Thomas Baron<sup>3</sup>  
\*franck.chollet@univ-fcomte.fr

<sup>1</sup> UFR Sciences et Techniques, Université de Franche Comté, Besançon

<sup>2</sup> Institut Supérieur d'Ingénieur de Franche-Comté (ISIFC), Université de Franche Comté, Besançon

<sup>3</sup> École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (ENSMM), Besançon

**RESUME :** Les micro/nanotechnologies ont été identifiées par la commission européenne et d'autres états comme des technologies d'appui essentielles (Key Enabling Technologies – KET) pour ce début de 21<sup>e</sup> siècle, avec des applications dans les capteurs, les biotechnologies, la photonique... Les établissements d'enseignement doivent accompagner cette évolution et assurer la formation d'étudiants connaissant et maîtrisant ces technologies, particulièrement au-delà des simples filières orientées microélectronique. Cette tâche n'est cependant pas sans difficulté car l'enseignement pratique de ces technologies réclame une infrastructure onéreuse (salle blanche) et présente des coûts élevés (consommables). A Besançon, en lien direct avec la reconnaissance de la région comme pôle des microtechniques en France, les établissements d'enseignement supérieur (l'Université de Franche-Comté (UFC), l'École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (ENSMM), l'Institut Supérieur d'Ingénieur de Franche-Comté (ISIFC), l'Institut Universitaire de Technologie Besançon-Vesoul (IUT-BV)), ont mis en place une plateforme mutualisée d'enseignement permettant en maintenant des coûts supportables d'adresser un public varié, depuis la première année d'étude supérieure, jusqu'à un niveau Master ou Ingénieur. Nous nous proposons de partager cette expérience afin d'exposer les principales difficultés rencontrées et de détailler les travaux pratiques qui sont proposés aux élèves dans différents modules d'enseignement.

**Mots clés :** dispositif pédagogique, transfert de savoir-faire, micro/nanotechnologie, salle blanche.

## 1 INTRODUCTION

Les micro/nanotechnologies sont sans nul doute un des thèmes les plus souvent mis en avant parmi les nouveaux moteurs de croissance du 21<sup>e</sup> siècle. A côté de l'enseignement des technologies de la microélectronique assuré de longue date dans quelques établissements spécialisés, celui des technologies des microsystèmes fait encore figure de parent pauvre. Il se heurte tout particulièrement à la difficulté d'assurer une partie pratique suffisamment évoluée pour arriver à faire assimiler les concepts réellement importants du domaine. Cette difficulté est exacerbée par les coûts importants de ces travaux pratiques, directement liés à l'infrastructure (salle blanche), au fonctionnement (machines de dépôt, de gravure...) et aux consommables (wafers, résines photosensibles...). Afin que cet obstacle ne devienne pas rédhibitoire et empêche le développement de ces enseignements, une stratégie de mutualisation semble la plus prometteuse sur le long terme.

La Franche-Comté est un pôle européen reconnu des microtechniques, continuant ainsi une tradition démarrée avec l'horlogerie dès le 18<sup>e</sup> siècle à Besançon et dans les vallées du Haut-Doubs. Cette fonction est portée au niveau de la recherche par l'Institut FEMTO-ST, et tout particulièrement par sa plateforme de micro/nanotechnologie qui fait partie du réseau Renatech des 6 centrales de technologie du CNRS. Cependant la haute qualité due aux utilisateurs de cette centrale ne permet pas d'assurer des enseignements en groupe important, qui perturberaient le fonctionnement de la salle blanche et occuperaient trop de créneaux horaires au détriment des autres utilisateurs (chercheurs, entreprises).

A côté des efforts en recherche, les activités en micro/nanotechnologie au 21<sup>e</sup> siècle réclame des technologues (techniciens, ingénieurs...) compétents qui soient formés au cœur de la région, au plus près des entreprises du secteur. Ainsi, au sein des établissements d'enseignement supérieur de Besançon, que ce soit dans les différentes composantes de l'Université de Franche-Comté (UFR-ST, ISIFC, IUT BV) ou à l'École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (ENSMM), il a été choisi de proposer aux étudiants une formation pratique locale en salle blanche pendant laquelle l'étudiant réalise lui-même des micro-dispositifs, comme des chercheurs du domaine.

Cet objectif ambitieux a nécessité une coopération complète avec les acteurs de la recherche en micro-nano-technologie locaux et un support important des différents établissements. Ainsi selon le niveau des étudiants (L1, L3, M2, Ingénieur 3<sup>e</sup> année), une offre de TPs gradués peut être proposée, depuis la simple initiation à la salle blanche jusqu'à la réalisation de composants microfluidiques complexes. Ces TP se déroulent pour les groupes importants dans une salle blanche à coût de fonctionnement réduit située au sein de l'ENSMM et dédiée uniquement à l'enseignement, ou pour des petits groupes plus spécialisés au sein de la salle blanche recherche de l'institut FEMTO-ST faisant partie du réseau Renatech des grandes centrales de technologie françaises.

Après avoir détaillé le cadre de ce fonctionnement avec des moyens mutualisés, nous reviendrons sur les différents types de TP que nous assurons ainsi que sur les objectifs pédagogiques poursuivis selon le niveau des étudiants.

## 2 PLATEFORME DE MUTUALISATION

### 2.1 Mise en place

Comme attendu dans la mise en commun de moyen entre différents établissements, la plus grande difficulté de l'équipe enseignante est de faire comprendre aux établissements l'intérêt du projet, et pourquoi il permet de renforcer l'ensemble des acteurs. C'est bien d'une initiative venant de la part des enseignants-chercheurs impliqués dans ces enseignements à travers les différents établissements, et qui avaient déjà travaillé ensemble, que cette mutualisation a pu avoir lieu.

Cette étape a pu se cristalliser dans notre cas à la suite d'une évolution dans le bâti de l'Institut FEMTO-ST qui faisait disparaître la salle blanche de la structure de recherche, dont une des fonctions principales étaient l'enseignement. Comme la salle blanche de recherche principale ne pouvait elle accueillir un usage intensif pour l'enseignement, il est apparu rapidement que la meilleure solution résidait dans la mutualisation de la salle blanche d'enseignement située à l'ENSMM.

Après discussions avec les établissements, la solution la plus rapide à mettre en œuvre a consisté à laisser la gestion de la salle enseignement à l'ENSMM, établissement hôte de l'infrastructure, et à permettre aux autres établissements de l'utiliser en contribuant des frais d'usage en fonction du nombre d'heures d'utilisation. Une convention dans ce sens a pu ainsi être signée en 2014, officialisant ce mode de fonctionnement.

De plus, la possibilité d'utiliser la salle recherche avec des petits groupes (enseignement spécialisé) a aussi été accordé par l'Institut FEMTO-ST, en contrepartie d'un paiement de frais d'utilisation.

### 2.2 Infrastructure

Les enseignements reposent donc sur deux salles blanches pour assurer les enseignements pratiques :

- la salle recherche de l'Institut FEMTO-ST [1], salle à l'état de l'art avec un arsenal complet d'équipement de micro/nanotechnologie, mais ne pouvant accueillir qu'un nombre restreint de groupe au cours de l'année
- la salle ENSMM, majoritairement dédiée à l'enseignement, et gardant la possibilité de faire des projets de recherche de façon occasionnelle

Cette dernière salle est la plus grande originalité de notre dispositif éducatif et assure en bonne partie sa réussite.

Afin de limiter ses coûts d'exploitation, elle ne permet de réaliser qu'un nombre limité d'étapes technologiques (lithographie, gravure) ciblé en vu de leur utilisation en TP. Son plan d'implantation est présenté Figure 1, et on notera qu'elle pourra évoluer car elle dispose de place pour accueillir quelques équipements supplémentaires et élargir la gamme des TP proposés.

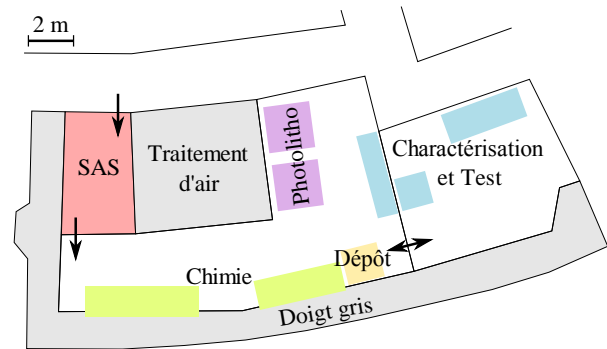


Figure 1 : Plan de la salle d'enseignement.

Les techniques disponibles sont :

- Photolithographie
  - résine fine positive. Possibilité d'avoir aussi des résines fines négative, réversible.
  - résine épaisse SU-8 2075 permettant l'électroformage de nickel jusqu'à 100µm d'épaisseur.
  - deux aligneurs double face (pour wafers 3 pouces) identiques permettant de réaliser la photolithographie double face en même temps
- Dépôts
  - pulvérisation (une cathode magnétron, possibilité de mettre deux autres cathodes)
  - dépôt électrolytique de nickel.
- Gravure
  - bain de gravure chimique.
- Caractérisation
  - deux microscopes avec caméras et logiciels de traitement d'image (dimensions)
  - profilomètre mécanique (épaisseur)
  - testeur sous pointe (4 pointes DC et 1 pointe RF)

La salle dispose d'espace pour permettre à plusieurs binômes/trinômes de travailler en même temps si le séquençage des TP est fait correctement. Tout particulièrement on notera la grande longueur (3,5 m) de pailasse de chimie.

### 2.3 Fonctionnement

Le pilotage de la salle enseignement est assuré par un Ingénieur de Recherche mise à disposition à 50% par l'ENSMM. Cette tâche consiste à suivre les infrastructures de la salle et assurer la gestion des stocks de consommables. De plus, il assure une partie des tâches d'enseignement dans cette salle pour le compte de l'ENSMM. Les autres TP sont encadrés par des enseignants-chercheurs de chaque établissement, en simple ou en double encadrement selon la complexité du TP.

La complexité des enseignements en salle blanche, et la dangerosité des produits utilisés restreint la taille des groupes à un effectif compris entre 8 et 12 étudiants. Ceux-ci sont ensuite répartis en binômes ou trinômes selon la taille du groupe et le TP réalisé. Cette contrainte forte nécessite souvent un soin particulier au niveau de l'organisation de l'emploi du temps car il ne correspond pas à la taille standard des groupes de TP (habituellement jusqu'à 16 étudiants).

La Table 1 résume les usages de la plateforme que ce soit pour la salle ENSMM (E) ou Recherche (R), montrant les différents publics d'étudiant accueillis. Le nombre d'heure correspond au nombre d'heure passé en salle blanche par un étudiant, généralement divisés en TP de 3h ou 4h.

Composante	Formation	h/salle	Effectif
ENSMM	Ingénieur 3 <sup>e</sup> année	10h/E	84
	Ingénieur 2 <sup>e</sup> année	12h/E	24
ISIFC/UFC	Ingénieur 3 <sup>e</sup> année	16h/E	25
UFR-ST/UFC	Licence 1 ST Starter	2h/R	96
	Licence 3 EEA	8h/E	16
	Licence Pro 3 Méca	8h/E	16
	Master 1 M2E2/PICS	8h/E	23
	Master 2 M2E2	8h/R	8
	Master 2 PICS	8h/R	6
IUT-BV/UFC	Licence Pro 3	4h/E	16
SMYLE	Master Microtechnique EPFL	2h/R	8

Table 1 : Enseignements assurés au sein de la plateforme enseignement micro/nanotechnologies pour l'année 2013-14

Le volume horaire important réalisé au sein de la plateforme demande une gestion détaillée des créneaux d'occupation des salles. En effet, les effectifs de certaines formations nécessitent une division en multiples groupe (de 8 à 12 étudiants), multipliant par autant le nombre de créneaux occupés, tout particulièrement dans la salle enseignement.

L'investissement (nouveaux équipements) et le fonctionnement de la salle recherche est fortement subventionné par le CNRS et l'ANR, permettant aux enseignements de ne devoir s'acquitter, au même titre que les autres utilisateurs, que d'un prix horaire fortement réduit. En revanche, l'utilisation de la salle enseignement nécessite un flux financier constant que ce soit au niveau des investissements ou du fonctionnement.

L'investissement pour cette salle est assuré par les établissements au coup par coup, comme pour d'autre activité nécessitant du matériel pédagogique. L'ENSMM assure une part importante de cet effort, avec des investissements dépassant 20k€ chaque année. De plus, la proximité de la plateforme d'enseignement avec la plateforme de recherche au sein de l'institut FEMTO-ST permet le transfert d'équipements recherches plus anciens, après généralement leur remise à niveau.

Les coûts de fonctionnement de la salle d'enseignement sont pris en charge par les établissements, en fonction de leur utilisation respective. De façon globale, ils peuvent être évalués à environ 50€/h pour un groupe d'une dizaine d'étudiants. Spécifiquement l'ENSMM alloue un budget annuel de fonctionnement d'environ 10k€/an et l'UFC finance son usage via un Projet d'Envergure pluriannuel (10k€/an).

### 3 TP : INTRODUCTION (L1)

#### 3.1 Titre2

Le titre des sous-sections est en 10pt, gras avec des espacements avant et après de 6 pt.

##### 3.1.1 Titre3

Le titre des sous-sous-sections est également en 10 pt, gras avec des espacements avant et après de 6 pt.

Les légendes des figures sont en 9 pt, italique, centrées, avec des espacements avant et après de 6 pt.

*fig 1 : Légende*

### 4 TP : GÉNÉRIQUE (M1)

### 5 TP : SPÉCIALISÉ (INGÉNIEUR 3)

### 6 CONCLUSION

L'objectif de ce modèle de communication est d'harmoniser la forme des communications présentées au CET-SIS'2013 à Caen, en cohérence avec les éditions passées. Nous vous remercions d'essayer de vous y conformer.

Pour les mêmes raisons, les organisateurs vous demandent de synthétiser votre communication dans un volume compris entre 4 et 6 pages.

#### Bibliographie

- [1] Premier Auteur, Deuxième Auteur, "Titre de l'article", *Journal de l'Enseignement des Sciences et Technologies de l'Information et des Systèmes (J3EA)*, Vol. x, y (2006), DOI 10.151/j3ea:2006021.
- [2] Premier Auteur, Deuxième Auteur, "Titre de la communication", *Actes du 2<sup>ème</sup> Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes (CESTIS-EEA'99)*, Montpellier (France), Novembre 1999, pp. xxx-yyy.