

Projet ANR-07-ROBO-0005

STIL μ FORCE

Programme PSIROB 2007

A	IDENTIFICATION.....	2
B	RESUME CONSOLIDE PUBLIC	2
B.1	Instructions pour les résumés consolidés publics	2
B.2	Résumé consolidé public en français	2
B.3	Résumé consolidé public en anglais.....	5
C	MEMOIRE SCIENTIFIQUE.....	6
C.1	Résumé du mémoire	6
C.2	Enjeux et problématique, état de l'art	7
C.3	Approche scientifique et technique.....	8
C.4	Résultats obtenus	8
C.5	Exploitation des résultats.....	11
C.6	Discussion	13
C.7	Conclusions.....	15
C.8	Références.....	15
D	LISTE DES LIVRABLES.....	17
E	IMPACT DU PROJET	17
E.1	Indicateurs d'impact	17
E.2	Liste des publications et communications.....	19
E.3	Liste des éléments de valorisation.....	20
E.4	Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires)	21

Ce document est à remplir par le coordinateur en collaboration avec les partenaires du projet. L'ensemble des partenaires doit avoir une copie de la version transmise à l'ANR.

Ce modèle doit être utilisé uniquement pour le compte-rendu de fin de projet.

A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	STIL μ FORCE
Titre du projet	Etude et développement de stations de mesure de micro et nano forces pour l'industrie
Coordinateur du projet (société/organisme)	ENSMM
Période du projet (date de début – date de fin)	5/2/2008 – 5/6/2011
Site web du projet, le cas échéant	

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	M. Emmanuel Piat
Téléphone	03-81-40-27-95
Adresse électronique	epiat@ens2m.fr
Date de rédaction	13/7/2011

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	femto-st dépt. AS2M femto-st dépt. MN2S STIL SA IFR 133 IBCT
---	---

B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

Ce résumé est destiné à être diffusé auprès d'un large public pour promouvoir les résultats du projet, il ne fera donc pas mention de résultats confidentiels et utilisera un vocabulaire adapté mais n'excluant pas les termes techniques. Il en sera fourni une version française et une version en anglais. Il est nécessaire de respecter les instructions ci-dessous.

B.1 INSTRUCTIONS POUR LES RESUMES CONSOLIDES PUBLICS

Les résumés publics en français et en anglais doivent être structurés de la façon suivante.

Titre d'accroche du projet (environ 80 caractères espaces compris)

Titre d'accroche, si possible percutant et concis, qui résume et explicite votre projet selon une logique grand public : il n'est pas nécessaire de présenter exhaustivement le projet mais il faut plutôt s'appuyer sur son aspect le plus marquant.

Les deux premiers paragraphes sont précédés d'un titre spécifique au projet rédigé par vos soins.

Titre 1 : situe l'objectif général du projet et sa problématique (150 caractères max espaces compris)

Paragraphe 1 : (environ 1200 caractères espaces compris)

Le paragraphe 1 précise les enjeux et objectifs du projet : indiquez le contexte, l'objectif général, les problèmes traités, les solutions recherchées, les perspectives et les retombées au niveau technique ou/et sociétal

Titre 2 : précise les méthodes ou technologies utilisées (150 caractères max espaces compris)

Paragraphe 2 : (environ 1200 caractères espaces compris)

Le paragraphe 2 indique comment les résultats attendus sont obtenus grâce à certaines méthodes ou/et technologies. Les technologies utilisées ou/et les méthodes permettant de surmonter les verrous sont explicitées (il faut éviter le jargon scientifique, les acronymes ou les abréviations).

Résultats majeurs du projet (environ 600 caractères espaces compris)

Faits marquants diffusables en direction du grand public, expliciter les applications ou/et les usages rendus possibles, quelles sont les pistes de recherche ou/et de développement originales, éventuellement non prévues au départ.

Préciser aussi toute autre retombée= partenariats internationaux, nouveaux débouchés, nouveaux contrats, start-up, synergies de recherche, pôles de compétitivités, etc.

Production scientifique et brevets depuis le début du projet (environ 500 caractères espaces compris)

Ne pas mettre une simple liste mais faire quelques commentaires. Vous pouvez aussi indiquer les actions de normalisation

Illustration

Une illustration avec un schéma, graphique ou photo et une brève légende. L'illustration doit être clairement lisible à une taille d'environ 6cm de large et 5cm de hauteur. Prévoir une résolution suffisante pour l'impression. Envoyer seulement des illustrations dont vous détenez les droits.

Informations factuelles

Rédiger une phrase précisant le type de projet (recherche industrielle, recherche fondamentale, développement expérimental, exploratoire, innovation, etc.), le coordonnateur, les partenaires, la date de démarrage effectif, la durée du projet, l'aide ANR et le coût global du projet, par exemple « Le projet XXX est un projet de recherche fondamentale coordonné par xxx. Il associe aussi xxx, ainsi que des laboratoires xxx et xxx. Le projet a commencé en juin 2006 et a duré 36 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de xxx € pour un coût global de l'ordre de xxx € »

B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS

Mesure de Micro et nano force par ressort magnétique

Etude et développement de stations de mesure de micro et nano force pour l'industrie

Le projet STIL μ FORCE est un projet de recherche industrielle qui a pour objectif de permettre à l'entreprise STIL SA de développer une maîtrise de la mesure basse fréquence de micro et nano force par l'approche des ressorts magnétiques. Deux capteurs ont été développés dans ce projet : un capteur ne mesurant qu'une composante horizontale de la force et un capteur capable de mesurer les 2 composantes horizontales ainsi que le couple vertical. Le premier est un capteur passif, le deuxième est décliné en version passive et active. Dans les deux cas, la force constitue le signal excitateur inconnu d'un transducteur (masse sismique macroscopique) dont seule la grandeur de sortie (déplacement de la masse sismique) est mesurable à l'aide de capteurs confocaux chromatiques conçus par la société STIL SA. La problématique de la reconstruction d'un signal d'entrée inconnu (force) à partir d'un signal de sortie bruité (déplacement) a débouché sur des dispositifs de mesure dont les performances (bande passante, temps de réponse, résolution) sont simples à ajuster et dont l'étalonnage est aisé. Ces dispositifs renforcent les moyens actuellement disponibles pour caractériser les propriétés mécaniques des micro-objets (raideur, force de friction, force d'adhésion, force d'interaction à distance, etc.).

Observation par filtrage de Kalman et synthèse H_2 de forces et couples inconnus excitant des ressorts magnétiques passifs ou actifs

Le défi technologique associé à ce projet a consisté à maîtriser les dispositifs de mesure de micro et nano force utilisant des ressorts magnétiques passifs ou actifs de manière à produire une estimation répétable de ces forces. Cela a nécessité entre autre d'attacher un soin particulier à la réduction des forces perturbatrices (bruit sismique basse fréquence et bruit acoustique infrasonore) générées par l'environnement. Un étalonnage des capteurs de type « presse-bouton » a aussi été développé avec la possibilité de contrôler visuellement la qualité de l'étalonnage. Le défi scientifique associé a consisté à synthétiser des observateurs à entrées inconnues (force ou couple) de manière à ce que l'estimation de ces entrées reste performante malgré la dynamique mal amortie du transducteur (du fait de l'inertie des masses sismiques), les bruits de mesure et l'incertitude sur la dynamique de la force inconnue. Cette problématique a été abordée sous l'angle du filtrage de Kalman (capteurs passifs) et de la synthèse H_2 (capteur actif). L'estimation des entrées inconnues (force ou couple) nécessite d'ajuster un unique paramètre qui règle un compromis entre la bande passante (qui conditionne le temps de réponse de l'estimation) et la variance de l'estimation (qui conditionne la résolution du capteur).

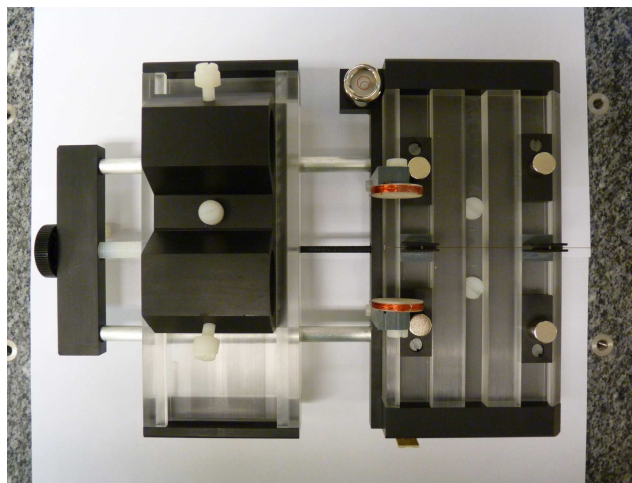
Résultats majeurs du projet

Un prototype de capteur (passif) de micro et nano force qui utilise la lévitation diamagnétique passive a été conçu et transféré au sein de la société STIL SA. Une pré-version industrielle a ensuite été développée sur la base de ce prototype. L'étude d'un deuxième capteur à 3 degrés de liberté (en version passive et active) qui utilise un principe de flottaison couplé à des ressorts magnétiques a conduit au développement d'un prototype de laboratoire. Ont été abordées sur ce prototype, la modélisation, la conception, la commande et l'observation de la force et du couple inconnus. En terme d'usage, ces capteurs ont permis de mesurer des nanoforces de pull-off (force de rupture d'adhésion), des nanoforces de friction et de caractériser des raideurs de micro-poutres et d'ovocytes humains. Ce projet s'est révélé très structurant pour les départements AS2M et MN2S de femto-st et a conduit au projet région FIMICAP (Fiabilisation du micro-assemblage et mise au point de capteurs intelligents par ingénierie des surfaces) qui implique les laboratoires femto-st, UTINAM, LERMPS et LCPR-AS et qui démarre en septembre 2011.

Production scientifique et brevets depuis le début du projet

La production scientifique associée à ce projet est de 3 articles de revue internationale, 1 article de revue nationale, 6 communications internationales (dont 1 multi partenaire), 1 communication nationale, et 3 colloques scientifiques.

Illustration



Capteur de nanoforce utilisant la lévitation diamagnétique.

Informations factuelles

Le projet STIL μ FORCE est un projet de recherche industrielle d'une durée de 3 ans et 4 mois (du 5/2/2008 au 5/6/2011). Il implique la PME STIL SA basée à Aix-en-Provence, les départements AS2M (Automatique et Systèmes Micro-Mécatronique) et MN2S (Micro Nano Sciences & Systèmes) de l'institut femto-st et l'unité IFR 133 - IBCT (Ingénierie et biologie Cellulaire et Tissulaire). Ce projet coordonné par le département AS2M de femto-st a bénéficié d'une aide ANR de 829 408 € (dont 388 780 € à destination des laboratoires publics) pour un coût global complet estimé à son démarrage de 1 849 802 €.

B.3 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

Micro and nano force measurement using magnetic springs

Study and development of micro and nano force measurement platforms for industrial use

The STIL μ FORCE project is an industrial research project. Its goal is to give the company STIL SA the ability to design low frequency micro and nano force sensors based on the magnetic spring principle. Two sensors were developed in this project: one is only a one-direction force sensing device and the other is able to measure the two horizontal components of the force and the vertical torque. The first is a passive sensor; the second can be either passive or active. In all cases, the force is the unknown excitation signal of a transducer (seismic macroscopic mass) whose only the output (seismic mass displacement) can be measured with confocal chromatic sensors build by STIL SA. The reconstruction problematic of an unknown input signal (force) with a noisy output signal (displacement) lead to measurement devices whose performances (bandwidth, response time, resolution) are easy to adjust and whose calibration is easy to perform. These devices reinforce current devices available on the market to characterize mechanical properties of micro-objects (stiffness, friction force, adhesion force, non-contact force, etc.).

Observation using Kalman filtering or H₂ synthesis of unknown force and torque exciting passive or active magnetic springs

The technological challenge associated to this project consisted in developing measurement devices of micro and nano force using passive or active magnetic springs so that the force estimation has a good repeatability. A particular care had been taken to reduce as much as possible the environmental disturbing forces (low frequency seismic noise infrasonic acoustic noise). A push-button calibration had also been developed that enable to visually control the calibration quality. The associated scientific challenge consisted in the synthesis of unknown input observer (force or torque) such that the estimation of these inputs remains good despite the low damped dynamic of the transducer (due to the inertia of the seismic mass), the noise measurement and the uncertainty on unknown input force. To solve this challenge, Kalman filtering framework (passive sensors) and H₂ synthesis framework (active sensor) had been used. As a result, the estimation of unknown inputs (force or torque) needs to adjust a single parameter which specifies a trade-off between the bandwidth (related to the response time of the estimation) and the variance of the estimation (related to the sensor resolution).

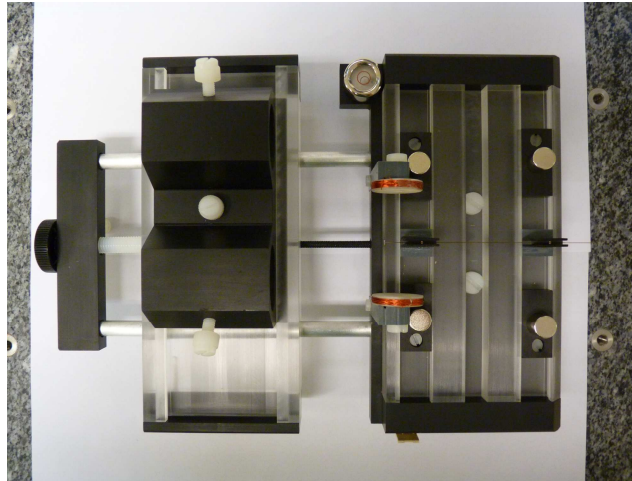
Major results

A prototype of a micro and nano force sensor using diamagnetic levitation was developed and transferred to STIL SA Company. An industrial pre-version based on this prototype had been developed after the transfer. A second sensor with 3 degrees-of-freedom (in passive or active configuration) that is using a buoyancy principle coupled with magnetic springs lead to the study and development of a laboratory prototype. The modelling, the design, the manufacturing, the control and the observation of the unknown force and torque had been studied in a PhD thesis. On a practical point of view, these sensors have been used to measure pull-off nanoforces, friction nanoforces and to characterize AFM microcantilevers stiffness and also human oocytes stiffness.

Scientific production since the beginning of the project

3 papers in international journals, 1 paper in a national journal, 6 papers in international conferences, 1 paper in a national conference, 3 scientific seminars.

Illustration



Nanoforce sensor using diamagnetic levitation

Factual information

The project STIL μ FORCE is a 40 months industrial research project (from 2/5/2008 to 6/5/2011). Partnership is composed of STIL SA French company located at Aix-en-Provence, AS2M department (Automatic Control and Micro-Mechatronic) and MN2S Department (Micro Nano Sciences & Systems) of the femto-st institute and IFR 133 – IBCT institute (Cellular and tissue engineering and biology). The project leader is AS2M. The global cost of this project estimated at its start was 1 849 802 €. ANR funding is 829 408 €.

C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

Mémoire scientifique confidentiel : non

C.1 RESUME DU MEMOIRE

Le projet STIL μ FORCE est un projet de recherche industrielle d'une durée de 3 ans et 4 mois (du 5/2/2008 au 5/6/2011). Les partenaires impliqués sont la PME STIL SA basée à Aix-en-Provence, les départements AS2M (Automatique et Systèmes Micro-Mécatronique) et MN2S (Micro Nano Sciences & Systèmes) de l'institut femto-st et l'institut IFR 133 - IBCT (Institut Fédératif de Recherche Ingénierie et Biologie Cellulaire et Tissulaire).

L'objectif de ce projet est de permettre à l'entreprise STIL SA de développer une maîtrise de la mesure basse fréquence de micro et nano force par l'approche des ressorts magnétiques. Les ressorts magnétiques utilisent un effet attracteur magnétique couplé à un effet répulseur afin d'être naturellement stables selon les 6 degrés de liberté de l'espace. Deux effets répulseurs ont été investigués dans ce projet : l'effet diamagnétique et la poussée d'Archimède. Cela a conduit à développer deux types de capteur de force. Le premier capteur qui utilise l'effet diamagnétique ne mesure qu'une composante horizontale de la force. Le deuxième qui utilise la poussée

d'Archimède mesure les 2 composantes horizontales de la force ainsi que le couple vertical. Le premier est un capteur passif, le deuxième est décliné en version passive et active. Dans les deux cas, la force constitue le signal exciteur inconnu d'un transducteur (masse sismique macroscopique) dont seule la grandeur de sortie (déplacement de la masse sismique) est mesurable à l'aide de capteurs confocaux chromatiques fabriqués par la société STIL SA. La problématique de l'estimation d'un signal d'entrée inconnu (force ou couple) à partir d'un signal de sortie bruité (déplacement) a été abordée sous l'angle du filtrage de Kalman (capteurs passifs) et de la synthèse H_2 (capteur actif). La synthèse des observateurs à entrées inconnues (force ou couple) a été menée de manière à ce que l'estimation de ces entrées reste performante et répétable malgré la dynamique très mal amortie du transducteur (du fait de l'inertie des masses sismiques macroscopiques), malgré les bruits de mesure et malgré l'incertitude sur la dynamique de la force ou du couple inconnu. L'estimation de chaque composante de la force ou du couple nécessite d'ajuster un unique paramètre par composante qui règle un compromis entre la bande passante (qui conditionne le temps de réponse de l'estimation de la composante) et la résolution du capteur (qui conditionne le rapport S/B de la composante estimée). Un soin particulier a été attaché à la réduction des forces perturbatrices (bruit sismique basse fréquence et bruit acoustique infrasonore) générées par l'environnement. Un étalonnage des capteurs de type « presse-bouton » a été développé avec la possibilité de contrôler visuellement la qualité de l'étalonnage. Le prototype de capteur (passif) de micro et nano force qui utilise la lévitation diamagnétique passive a été transféré au sein de la société STIL SA. Une pré-version industrielle a ensuite été conçue sur la base de ce prototype. L'étude du deuxième capteur à 3 degrés de liberté (en version passive et active) qui utilise la flottaison par poussée d'Archimède a uniquement conduit au développement d'un prototype de laboratoire. Ont été abordées sur ce prototype la modélisation, la conception, la commande (pour la version active) et l'observation de la force et du couple inconnus. En terme d'usage, ces capteurs ont permis de mesurer des forces de pull-off (nano et microforce de rupture d'adhésion), des nanoforces de friction et de caractériser des raideurs de micro-poutres et d'ovocytes humains.

C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

La mesure de forces inférieures au millinewton est une problématique scientifique et technique associée à un marché émergent sur lequel sont positionnés peu d'acteurs industriels. Ce marché est donc voué à se développer à moyen terme. Tout capteur de force doit utiliser un transducteur qui convertit la force inconnue en un déplacement qui est une grandeur mesurable [1]. Le ratio force/déplacement en régime stationnaire correspond à la raideur (en N/m) du capteur. Les capteurs de micro et nano force qui sont parvenus au stade industriel utilisent généralement comme transducteur des microstructures élastiques [11] dont la production nécessite des moyens lourds (salle blanche). Diverses technologies existent (mais toutes ne sont pas forcément commercialisées) : AFM [12,13], capteurs piezorésistifs [14], capteurs capacitifs ([15] et produits de l'entreprise femtotoools), ... La mesure du déplacement peut être soit intégrée au capteur (technologie MEMS), soit déportée (diode laser sur les AFM par exemple). Un capteur avec une faible raideur aura une plage de mesure restreinte mais une bonne résolution. A contrario, un capteur avec une forte raideur aura une plage de mesure étendue mais une résolution limitée. Les raideurs existantes permettent de couvrir la plage allant du nanonewton à quelques centaines de micronewton, voir quelques millinewton. L'ordre de grandeur de la bande passante est le kilo Hertz. La précision des mesures effectuées reste incertaine car il n'existe pas de métrologie certifiée en deçà du millinewton [16]. De ce fait, la certification des capteurs de micro et nanoforce et des protocoles de mesure est un problème ouvert [10].

L'enjeu de ce projet est de concevoir des capteurs utilisant comme transducteur, non pas des microstructures élastiques, mais des masses sismiques macroscopiques simples à produire par des moyens d'assemblage conventionnels. Ces masses rigides sont maintenues par des ressorts magnétiques et convertissent les forces externes qui leur sont appliquées en déplacements. Les raideurs associées sont du même ordre que celles des cantilevers les plus souples des AFM (typiquement 0.01 N/m). Du fait de l'inertie importante des masses sismiques, les bandes passantes sont limitées à quelques Hertz. La conception de ces capteurs s'appuie sur un ancrage partenarial à la fois académique et industriel : les prototypes développés en laboratoire utilisent les moyens de mesures de déplacements du partenaire industriel STIL SA (mesure déportée à l'aide du principe confocal chromatique). Ils sont testés et améliorés par les partenaires académiques puis déclinés en version pré-industrielle par STIL SA.

C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

A l'enjeu du projet décliné en C.2 a répondu une approche scientifique et technique en 5 points :

1. conception et fabrication mécanique de deux systèmes de mesure de forces : maîtrise des ressorts magnétiques avec 1 ddl exploité puis 3 ddl exploités (SP1-SP2),
2. traitement de l'information : déconvolution des signaux de déplacement pour remonter aux forces appliquées aux masses sismiques en tenant compte de la dynamique faiblement amortie des ressorts magnétiques (grande inertie des masses sismiques macroscopiques) et des bruits de mesure (SP1-SP2),
3. commande de processus multivariables pour ce qui concerne la version active du capteur de force avec 3 ddl exploités (SP2),
4. test des performances obtenues : essais de caractérisation de surface (mesure de force de pull-off), essai de caractérisation statique de microstructures élastiques, essais de caractérisation de raideur de cellule (ovocyte humain) en milieu liquide et essais de caractérisation de forces de friction en nanotribologie (SP3-SP5)
5. spécification de prototypes industriels et prospective de marché potentiel pour ces capteurs (SP4)

Les trois premiers points ont impliqué les partenaires femto-st/AS2M et STIL SA du démarrage du projet jusqu'à T0+2 ans. Le quatrième point a impliqué les deux partenaires femto-st/AS2M, femto-st/MN2S et le partenaire biomédical IBCT à partir de T0+2 ans et jusqu'à la fin du projet. MN2S et IBCT intervenaient ici en qualité d'expert pour tester les systèmes de mesure. Le cinquième point a impliqué les partenaires femto-st/AS2M et STIL SA sur cette même période.

Les actions menées dans les points 1,2,3 et 5 sont détaillées dans la section C.4. Le point 4 est détaillé dans la section C.5.

C.4 RESULTATS OBTENUS

Toutes les actions associées initialement à l'étude et au développement d'un capteur de force par lévitation diamagnétique (SP1) ont toutes pu être conduites :

- un ingénieur R&D de chez STIL SA (David Marsaut) a été formé par ASM2 au principe des ressorts magnétiques passifs stabilisés par effet diamagnétique,
- un simulateur numérique sous matlab/simulink du comportement statique et dynamique du capteur (avec affichage 3D sous OpenGL du capteur et des forces appliquées) a été développé par AS2M pour l'aide à la conception du capteur et transféré chez STIL SA,
- AS2M et STIL ont intégré le capteur confocal chromatique à la structure mécanique du capteur,
- STIL SA. a conçu l'interface de puissance pour générer un courant dans les bobines du capteur pendant la phase d'étalonnage (sur la base d'un cahier des charges transmis par AS2M) puis AS2M a intégré le procédé d'étalonnage qui utilise une identification de type ARMA [1,3],
- AS2M a développé la chaîne de traitement de l'information qui estime à l'aide d'un filtrage de Kalman la force à partir de la mesure bruitée du déplacement de la masse sismique. Cette estimation tient compte de la dynamique très mal amortie du transducteur (du fait de l'inertie de la masse sismique), des bruits de mesure et de l'incertitude sur la dynamique de la force qui est modélisée à l'aide d'un processus de Wiener [1,2]. L'estimation de la force nécessite d'ajuster uniquement un paramètre qui est une densité spectrale de puissance (N^2/Hz) qui règle un compromis entre la bande passante en force du capteur et sa résolution. L'incertitude introduite par l'échantillonnage est prise en compte. La bande passante et la résolution sont fournies à l'utilisateur lorsqu'il ajuste le paramètre de réglage [2].
- AS2M a étudié l'influence d'un effort transversal perturbateur sur l'erreur de mesure de la force longitudinale [3],
- Lors du transfert du capteur chez STIL SA, une démonstration d'un procédé de fabrication de la masse sismique a été effectué par AS2M. STIL SA a ensuite continué à étudier ce procédé en faisant des tests de l'état de surface de l'extrémité de la masse sismique (capillaire en verre) et en faisant des tests de fabrication en série des déflecteurs en verre collés à l'arrière de la masse sismique.

L'ensemble de ces actions a conduit au développement d'un prototype fonctionnel (cf. figure 1) qui a été transféré chez STIL les 17-18-19 novembre 2009. Ce capteur mesure la force appliquée selon l'axe longitudinal de la masse sismique qui est un capillaire en lévitation d'une masse comprise entre 20 et 80 mg. Bien que cette masse résonne typiquement à trois hertz avec une fréquence de coupure à quatre hertz, la bande passante en force peut facilement être étendue jusqu'à 20 Hz grâce au réglage du compromis entre résolution et bande passante. La raideur est ajustable et comprise entre 0.005 N/m et 0.03 N/m. La plage maximum de mesure est d'environ 40 μ N. La résolution minimum atteint le nanonewton (cf. C6). Le développement d'une station de caractérisation de raideur mécanique qui était initialement prévue n'a pas été fait sur ce prototype mais sur la pré-version industrielle qui a suivi.

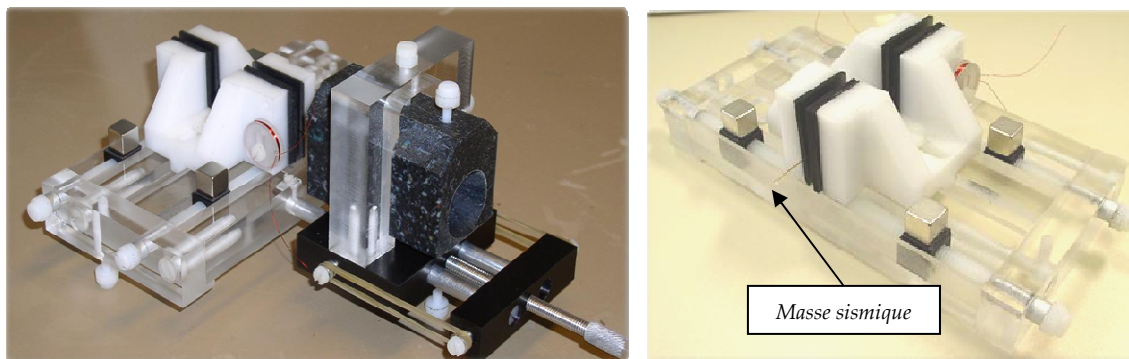


Fig. 1 – prototype de capteur de micro et nanoforce par lévitation diamagnétique avec sa masse sismique (microcapillaire en verre situé entre les plaques de graphite diamagnétique noir). Le capteur confocal chromatique normalement disposé à l'arrière n'est pas présent.

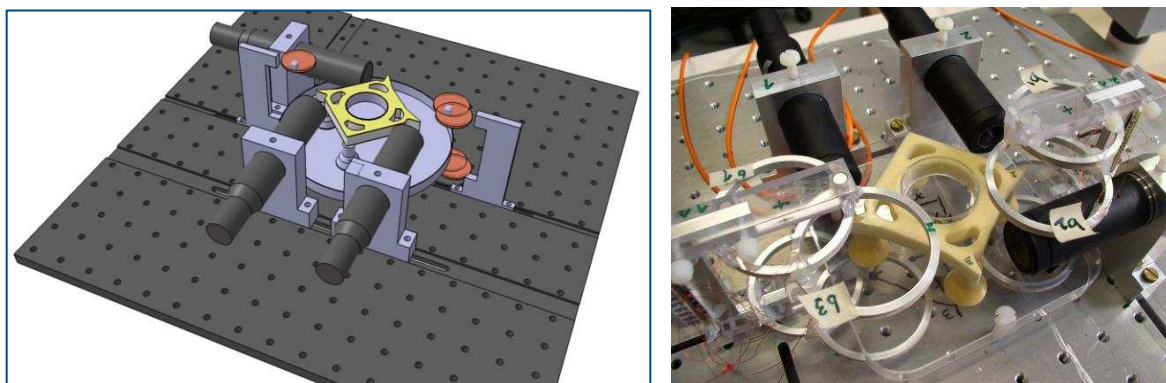


Fig. 2 – prototype de capteur de micro et nanoforce par flottaison. La masse sismique est la structure en jaune (mousse rigide avec une boîte de pétri au centre pouvant optionnellement accueillir un milieu liquide). Cette structure flotte sur un plan d'eau grâce à quatre flotteurs. Les trois capteurs confocaux chromatiques (cylindres) sont présents.

Les actions associées à l'étude et au développement du capteur par flottaison (SP2) sont globalement similaires à celles de SP1. Cependant, elles n'ont pas été effectuées en totalité (cf. C6). Ce capteur permet la mesure des deux composantes de la force dans le plan horizontal et la mesure du couple selon l'axe vertical. Ont été abordées sur ce prototype la modélisation, la conception [4,5,6], la commande (pour la version active) et l'observation de la force et du couple inconnus. La synthèse de la commande (de dimension 3) et de l'observation (de dimension 9) a été faite dans le cadre de la synthèse H_2 et ne nécessite d'ajuster que 2 paramètres scalaires de haut niveau qui sont un horizon d'observation et un horizon de commande [7]. Cette méthode ne nécessite pas de connaissance a priori sur les bruits d'état et de mesure et permet un réglage intuitif du compromis entre la variance et le temps

de réponse de l'estimateur de force et de couple. Ce travail a conduit à la soutenance de la thèse d'Ali Cherry le 4 juin 2009 [8] et a permis de développer un prototype de laboratoire (cf. figure 2) qui n'a cependant pas été transféré chez STIL SA (cf. C6). La masse sismique pèse typiquement 4 grammes, ce qui induit une réduction de la bande passante par rapport à celle du capteur par lévitation. Les performances en termes de plage de mesure et de résolution théorique sont similaires, néanmoins ce capteur est beaucoup plus sensible aux perturbations externes, ce qui réduit sa résolution effective.

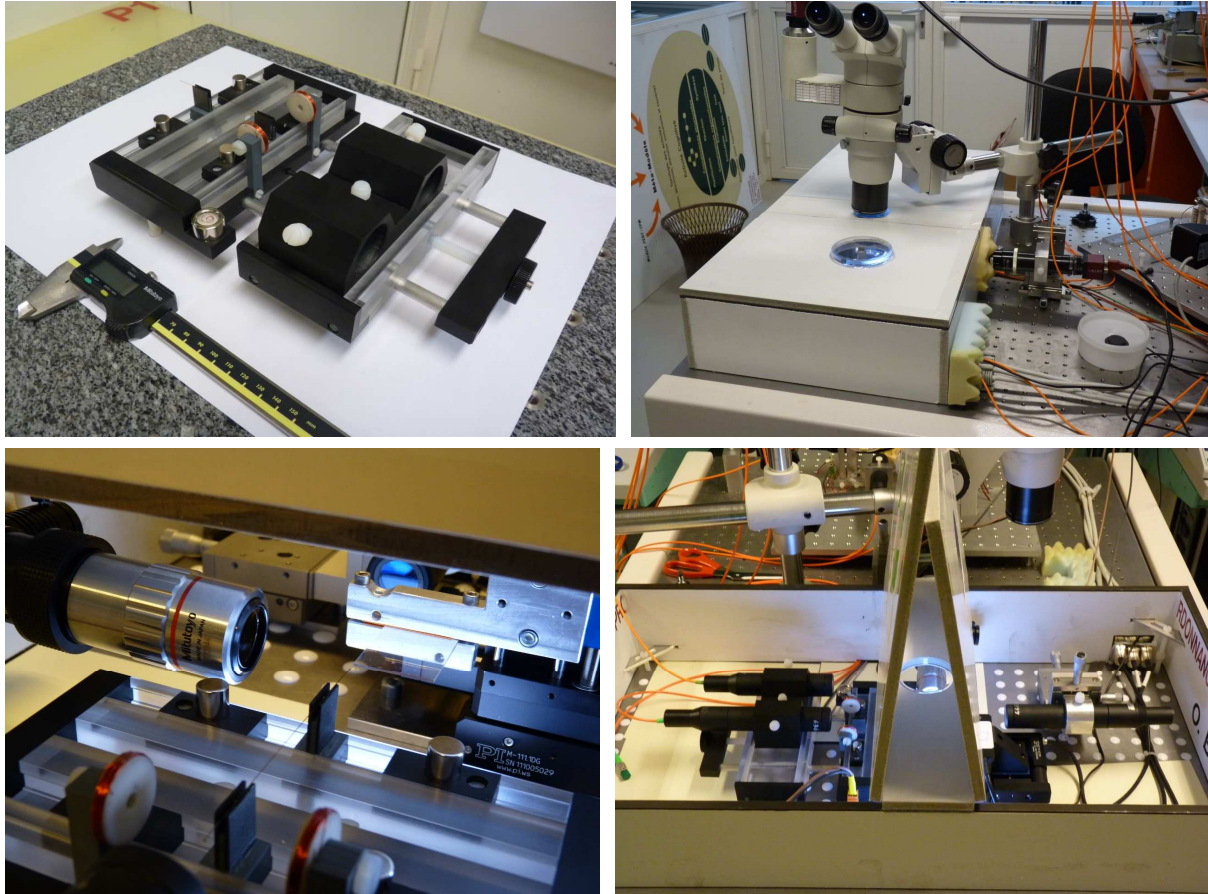


Fig. 3 – pré-version industrielle (les deux capteurs confocaux qui peuvent être alternés ne sont pas présents en haut à gauche) et sa cloche avec les dispositifs de vision (vue du dessus et vue de côté). Sur la figure en bas à droite on peut voir le dispositif qui permet en plus de mesurer la déformation d'une microstructure élastique pour caractériser sa raideur.

Le développement d'une pré-version industrielle des prototypes de laboratoire (SP4) n'a été commencé que sur le capteur par lévitation diamagnétique. Contrairement au prototype de laboratoire, la pré-version industrielle (cf. figure 3) permet actuellement :

- d'alternier la mesure du déplacement de la masse sismique à l'aide de 2 capteurs confocaux différents selon la plage de force et la résolution souhaitée,
- de changer à volonté les « têtes de mesure » du capteur, chaque tête ayant une masse sismique dont la hauteur a été pré-réglée pour être dans l'axe du capteur confocal (ce point permettra à la société STIL SA de commercialiser plusieurs têtes de mesure),
- d'observer en vue de dessus et en vue latérale le point où est appliqué la force afin de vérifier que la masse sismique a un mouvement unidirectionnel correct sous l'action de cet effort,
- de disposer le capteur sous une cloche pour limiter les perturbations infrasonores. Deux capots amovibles sont présents pour faciliter l'accès à la masse sismique.
- de disposer le capteur sur une table anti vibration passive pour limiter les perturbations sismiques. L'alimentation en air comprimé peut être coupée (vannes) pendant les mesures afin d'avoir une assiette

parfaitement stable dans le temps pour le capteur (sans quoi la masse sismique se transforme en inclinomètre ultra sensible ce qui fait dériver la mesure du déplacement).

L'estimation de la force par filtrage de Kalman a été portée avec succès sur le contrôleur DUO (boîtier de mesure) de STIL SA dont le noyau fonctionne sous Linux. Les capteurs confocaux chromatiques sont branchés sur ce boîtier qui calcule à chaque instant d'échantillonnage la force appliquée sur la masse sismique à partir de la mesure de déplacement. L'étape de calibration basée sur un algorithme ARMA tourne pour l'instant de manière déportée via Matlab sur un PC relié au boîtier. L'entreprise Rogue Wave Software spécialisée dans le portage d'algorithme de type ARMA sous diverses cibles pourrait à terme permettre ce portage grâce à sa librairie IMSL.

C.5 EXPLOITATION DES RESULTATS

Les partenaires AS2M, MN2S et IBCT ont mené plusieurs protocoles de test sur les capteurs développés :

- une campagne de mesure systématique de forces de pull-off en contact sphère-plan a été réalisée avec le capteur par lévitation diamagnétique. Les billes utilisées étaient en nitrure de silicium ($\varnothing 600 \mu\text{m}$) et les substrats en silicium 100 (avec ou sans revêtement OTS hydrophobe). Pour des taux d'humidité relative de 35 et 55%, des charges de compression statique de $1 \mu\text{N}$, $2 \mu\text{N}$ et $3 \mu\text{N}$ ont été appliqués pendant 10 secondes. Les substrats hydrophobes ont permis d'obtenir une bonne reproductibilité de mesures avec une tendance d'évolution des forces de pull-off selon la compression statique conforme à celle des modèles développés par MN2S. La dispersion des mesures avec les substrats hydrophiles n'a pas permis leur exploitation à cause des forces de capillarité très variables. La courbe à gauche sur la figure 4 montre une courbe de force typique obtenue pendant une mesure de pull-off avec les phases de chargement, de compression statique, de déchargement, d'adhésion puis de rupture d'adhésion [1,2]. Après la rupture, on voit que l'estimation de la force par filtrage de Kalman donne bien une force quasi nulle (courbe verte) contrairement à une estimation statique de type $F = Kx$ qui ne tient pas compte de l'inertie de la masse sismique en régime dynamique.

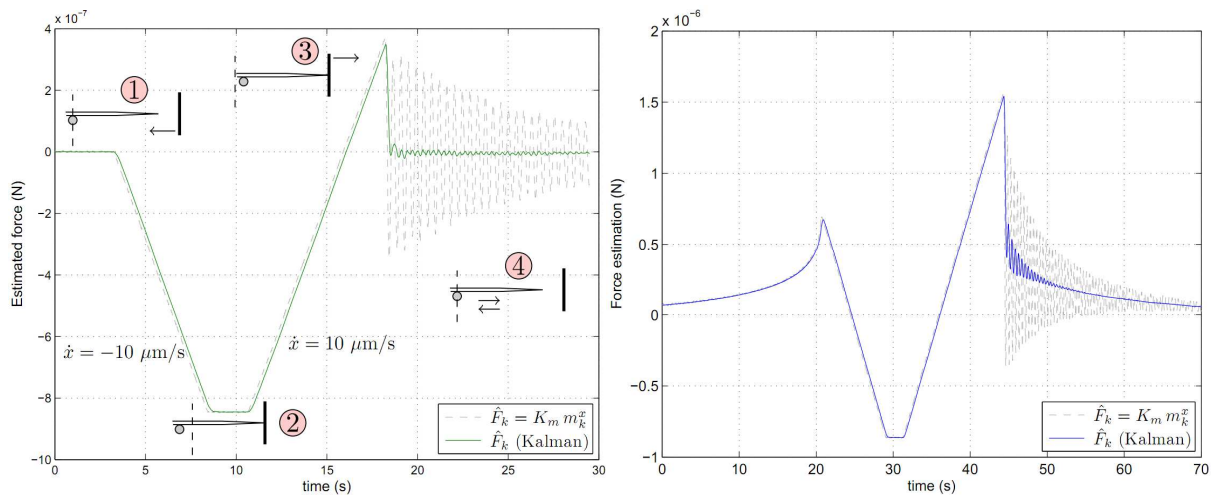


Fig. 4 – mesures de force de pull-off sans ou avec présence d'une force à distance électrostatique.

- La mesure de force à distance de type électrostatique pendant une mesure de pull-off a également été effectuée [2] lors d'interactions entre une sphère chargée et un substrat en verre (cf. courbe de droite en bleu sur la figure 5). Il reste néanmoins à comparer ces mesures avec les résultats fournis par des modèles de forces électrostatiques en interaction sphère-plan ou sphère-sphère.
- des nanoforces de friction ont été mesurées à l'aide du capteur par lévitation diamagnétique entre un substrat hydrophile ou hydrophobe et une microstructure en verre [9] obtenue par le collage de 3 microsphères (cette structure a été choisie afin d'éviter le roulement). Un comportement de type glissement a bien conduit à des forces de friction tangentielles du même ordre de grandeur (cf. les courbes de mesure à gauche sur la figure 5).

Cet ordre de grandeur varie en fonction du point d'application de la force qui peut engendrer un mouvement de rotation de la structure. Un déplacement de type stick-slip est observé avec un revêtement hydrophobe (cf. figure 5 à droite).

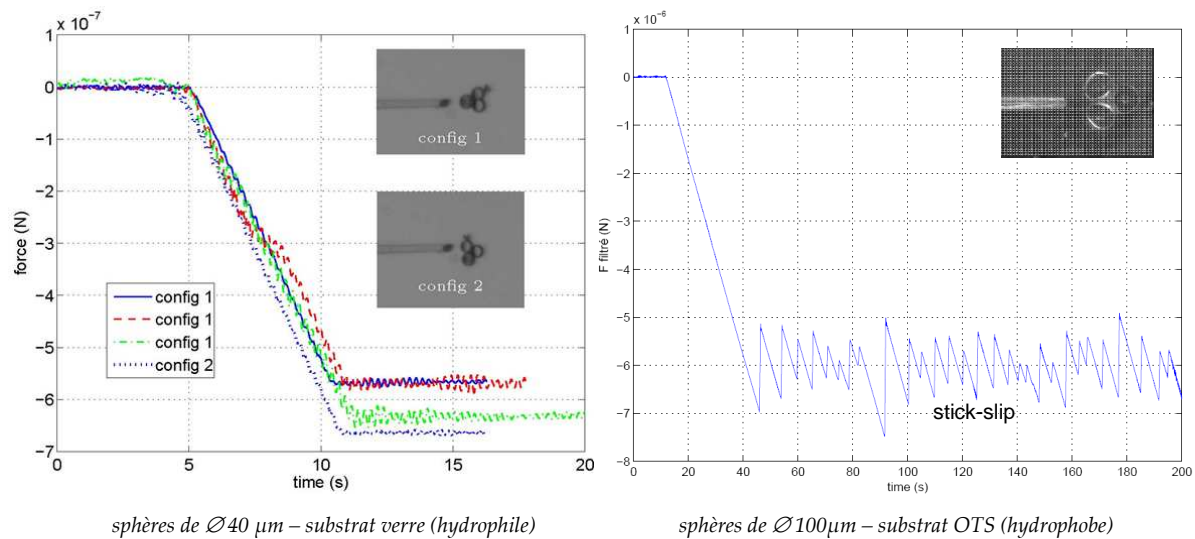


Fig. 5 – mesures de force de friction.

- des caractérisations de raideur de poutres en résine SU8 et de cantilevers d'AFM ont été menées (cf. figure 6). Ce type de caractérisation nécessite de mesurer la déformation des poutres. La déformation de la poutre SU8 a été déterminée en utilisant des moyens optiques (capteur CDD d'un réflecteur numérique haute résolution placé dans le plan focal d'une loupe binoculaire) à l'aide d'un algorithme de corrélation spatiale (travail réalisé en collaboration avec le département d'optique de femto-st). La déformation des cantilevers d'AFM a été mesurée avec 2 capteurs confocaux de STIL SA à l'aide d'une mesure différentielle. Afin d'évaluer les résultats obtenus, la raideur des cantilevers d'AFM a également été établie par d'autres moyens de caractérisation (étude vibratoire selon le mode 2 de la poutre montée sur un support d'AFM et caractérisation par mesure du bruit thermique à l'aide d'un MEMS analyser). Cette campagne menée avec des cantilevers d'AFM très raides a donné des résultats moyens avec le capteur par lévitation diamagnétique car il était difficile de mesurer de manière répétable la déflexion de la poutre. Celle-ci était très faible avec les chargements effectués du fait de la faible raideur du capteur comparativement à celle de la poutre. Une nouvelle campagne de comparaison avec des poutres beaucoup plus souples sera effectuée en septembre 2011.

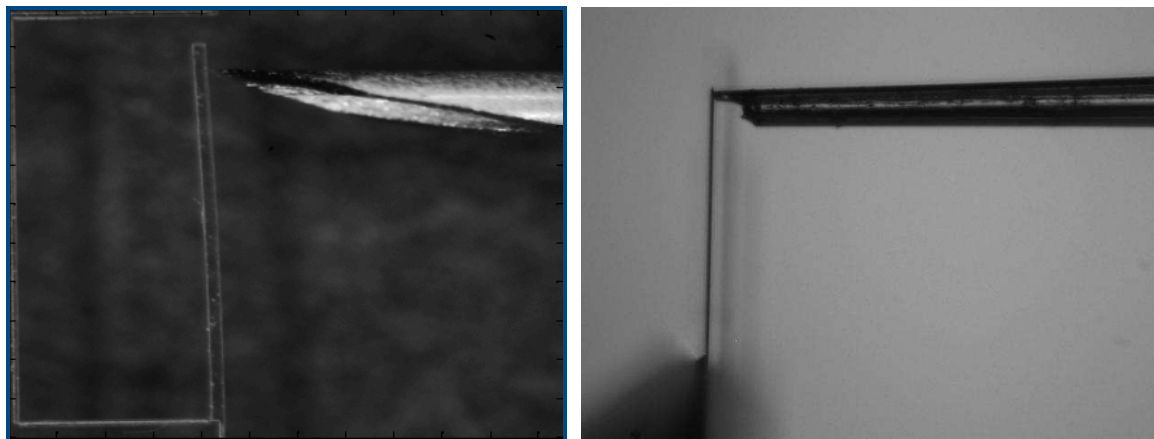


Fig. 6 – caractérisation de raideur de poutre en résine SU8 d'épaisseur 50 µm (gauche)

et de cantilever d'AFM d'épaisseur 1 μm (droite).

- des mesures de force (chargement/déchargement) et de couple en milieu sec ont été réalisées avec le capteur par flottaison [6] (cf. figure 7). elles ont permis de montrer que la sensibilité de ce capteur aux perturbations environnementales est environ dix fois supérieure à celle du capteur par lévitation diamagnétique. L'influence des efforts perturbateurs retardés dus à la propagation dans le liquide des ondes de volume ou de surface générées par les flotteurs est négligeable en mode quasi-statique mais son évaluation en mode dynamique a été peu étudiée. L'emploi de différentes huiles de silicone à la place de l'eau distillée (avec différentes propriétés visco-élastiques) va être testé prochainement.

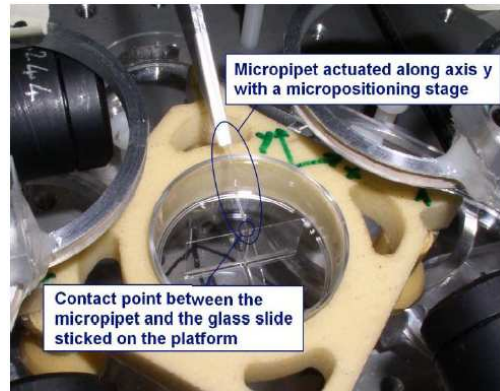
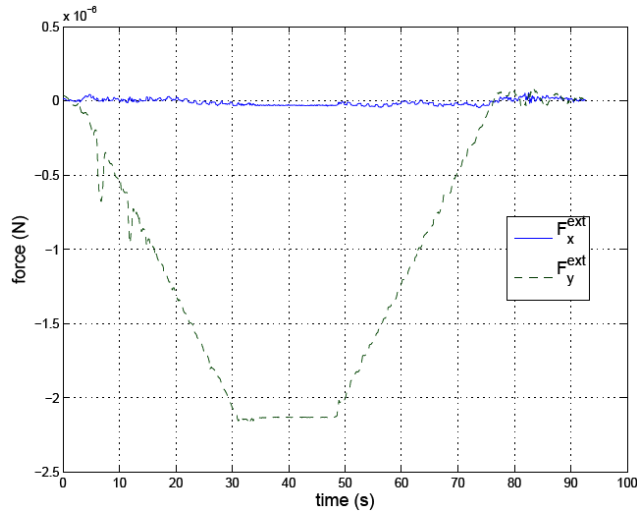


Fig. 7 – mesure de force dans le plan de type chargement / déchargement avec le capteur par flottaison.

- La faisabilité de mesure en milieu liquide et notamment la caractérisation de raideur d'ovocyte (SP5) prévue en fin du projet a pu être abordée à l'aide du capteur par flottaison en mode quasi-statique (cf. figure 8). L'ordre de grandeur des raideurs mesurées sur un panel d'ovocytes à un stade donné de maturation est de 0.007 N/m, ce qui fait de l'ovocyte humain une cellule particulièrement souple. La facilité d'utilisation du système très similaire à celle des systèmes d'insémination artificielle de type ICSI a été notée par le partenaire IBCT. Une campagne de mesure avec des ovocytes à divers stades de maturité est prévue pour octobre 2011. Un effort perturbateur additionnel induit par le milieu liquide de culture dans lequel plonge l'ovocyte et l'effecteur (microcapillaire) qui vient effectuer sur ce dernier un effort de compression a néanmoins pu être mis en évidence. Cet effort va de indétectable dans l'eau pure avec la résolution actuelle du capteur jusqu'à 0.2 à 0.5 μN dans le milieu de culture des ovocytes. Cet effort se transmet sur plusieurs centimètres (cf. figure 9) et il convient de le mesurer avant la compression de l'ovocyte pour pouvoir le soustraire lors du calcul de la raideur. Une relaxation extrêmement lente de cet effort perturbateur a été observée. Elle pourrait être due à l'évaporation du liquide qui induit une modification du ménisque au niveau du microcapillaire et de la boîte de pétri. L'étude physique de cet effort perturbateur qui peut être dû aux tensions de surface et aux effets viscoélastiques du milieu de culture est une perspective à ce projet.

C.6 DISCUSSION

Le degré de réalisation des objectifs académiques initiaux est bon. Tous les objectifs sur le capteur par lévitation diamagnétique ont été atteints (SP1) et la pré-version industrielle fonctionne correctement. Bien qu'il soit fonctionnel en l'état en mode passif, le prototype de capteur par flottaison (SP2) n'est pas suffisamment mur pour permettre une industrialisation :

- le filtrage des efforts perturbateurs retardés dus aux déplacements des flotteurs dans le liquide de flottaison n'a pas pu être développé. Des liquides (huile de silicone) avec différentes propriétés visco-élastiques n'ont pas été testés. En conséquence de quoi, ce capteur n'est actuellement utilisé qu'en mode quasi-statique.

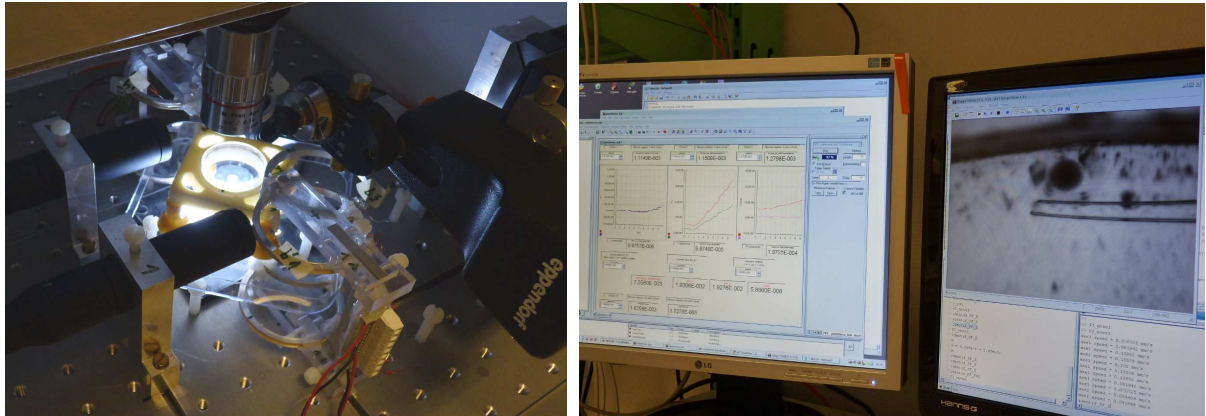


Fig. 8 – Caractérisation de raideur d'ovocytes à l'aide du capteur par flottaison.

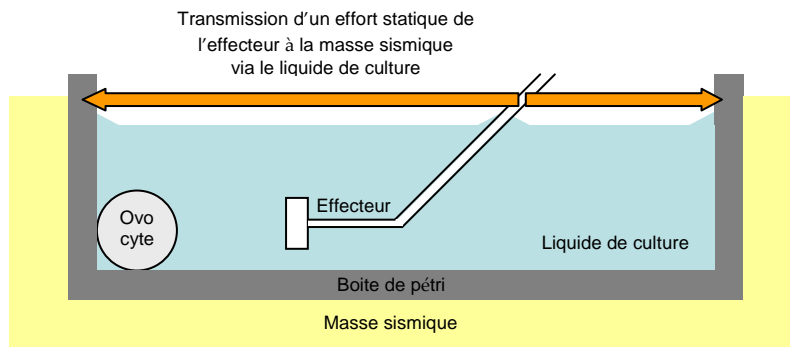


Fig. 9 – Effort perturbateur transmis à la masse sismique induit par l'interaction statique existante entre le liquide de culture et l'effecteur

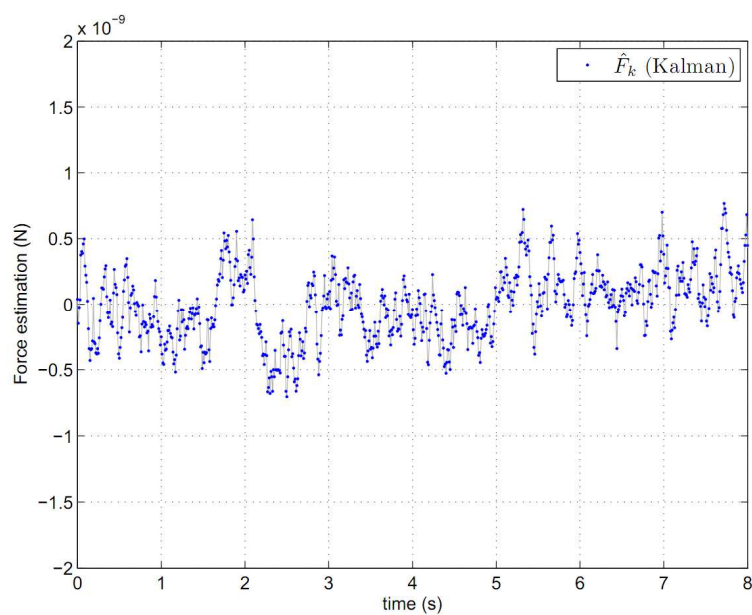


Fig. 10 – Efforts perturbateurs appliqués sur la masse sismique du capteur par lévitation diamagnétique

- la version active du capteur par flottaison ne fonctionne que sur simulateur sous Matlab/Simulink et la loi de commande n'a pas pu être portée sur le DSP par manque de ressource humaine à la fin du projet. Néanmoins l'observateur discrétisé associé à cette loi de commande a été porté sur le DSP puisqu'il est utilisé dans la version passive.

La sensibilité des ressorts magnétiques aux perturbations basse-fréquence (vibrations des aimants porteurs d'origine sismique et vibrations des masses sismiques d'origine subsonique) induit une limitation de la résolution de mesure. De ce fait un soin particulier a été pris pour réduire au maximum ces perturbations. Sur le capteur par lévitation diamagnétique, elles sont actuellement de l'ordre de ± 1 nanonewton [2] lorsqu'on opère sous cloche et sur table anti-vibration passive (cf. figure 10). Descendre en deçà de cette résolution nécessitera d'estimer ces efforts perturbateurs afin de les compenser. Ce point constitue la principale perspective scientifique et technique du projet.

Bien que les validations expérimentales prévues initialement dans SP3 aient pu être menées à bien, leur validité reste incertaine (une bonne répétabilité ne signifie pas une bonne précision de mesure) comme c'est actuellement le cas pour toutes les mesures de force en deçà du millinewton quelle que soit la technologie employée. Seule des validations croisées avec d'autres moyens de mesure de force et un travail de caractérisation des incertitudes (absolues) des mesures de forces qui tiennent compte de toutes les erreurs de modélisation permettront d'avancer sur ce point. Ce problème encore peu abordé par la communauté scientifique est très complexe mais d'actualité.

L'étude de faisabilité d'un nanotribomètre à l'aide du capteur par flottaison en version active (SP5) qui était prévue en fin de projet n'a pas pu être menée puisque ce capteur n'est pas encore opérationnel dans ce mode. Néanmoins, une étude de mesure de force de friction selon une direction a été anticipée à l'aide du capteur par lévitation (cf. C.5) et a donné des résultats intéressants. Ceci démontre que les ressorts magnétiques ont un potentiel certain en nanotribologie puisqu'ils comblent un chaînon manquant entre les AFM (souvent utilisés en contexte mono-aspérité) et les nanotribomètres (utilisés en contexte multi-aspérité). Les AFM sont capables de mesurer des forces tangentielles de quelques nanonewtons à quelques micronewtons avec une résolution de l'ordre du nanonewton. Les nanotribomètres sont capables de mesurer des forces tangentielles de quelques dizaines de micronewton à quelques millinewtons avec une résolution de quelques micronewtons. Avec une plage de mesure allant jusqu'à environ 40 μN et une résolution de quelques nanonewtons, les ressorts magnétiques s'intercalent donc entre les deux.

C.7 CONCLUSIONS

Ce projet a montré qu'en basse fréquence, les masses sismiques macroscopiques couplées à des ressorts magnétiques constituent un moyen de mesure complémentaire aux capteurs utilisant des microstructures élastiques. Le principal avantage des masses sismiques macroscopiques est leur facilité de fabrication et de mise en œuvre ; ainsi qu'une grande plage de mesure couplée à une bonne résolution. Le principal inconvénient est leur inertie importante qui nécessite de mettre en œuvre des approches de déconvolution du déplacement pour remonter à la force ou au couple. Les approches développées dans ce projet sur la base des outils de l'automatique permettent d'estimer les forces en régime dynamique jusqu'à une vingtaine de Hertz lorsque la masse sismique résonne à trois hertz avec une fréquence de coupure à quatre hertz. En terme de dynamique de recherche, ce projet s'est révélé très structurant pour les départements AS2M et MN2S de femto-st et a joué un rôle important dans le montage du projet région FIMICAP (fiabilisation du micro-assemblage et mise au point de capteurs intelligents par ingénierie des surfaces) d'une durée de 3 ans qui implique les laboratoires femto-st, UTINAM, LERMPS et LCPR-AS. Ce nouveau projet démarre en septembre 2011.

C.8 REFERENCES

- [1] E. Piat, J. Abadie, S. Oster, Nanoforce estimation with Kalman filtering applied to a force sensor based on diamagnetic levitation, Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems – IROS'2011, Sept. 25-30, 2011, San Francisco, 6 pages, accepted.

- [2] E. Piat, J. Abadie, S. Oster, *Nanoforce estimation with trade-off between bandwidth and resolution applied to a force sensor based on diamagnetic levitation*, Sensors & Actuators: A. Physical, 15 pages, en attente de révision.
- [3] J. Abadie, E. Piat, S. Oster, M. Boukallel, *Modelling and experimentation of a passive nanoforce sensor based on diamagnetic levitation*, Sensors & Actuators: A. Physical, 31 pages, accepté sous condition de révision de l'anglais (en cours).
- [4] A. Cherry, J. Abadie, E. Piat, *Microforce sensor for microbiological applications based on a floating-magnetic principle*, Proc. of the IEEE International Conference of Robotics and Automation – ICRA'07, pp 10-14, Italie, 10-14 avril 2007.
- [5] A. Cherry, J. Abadie, E. Piat, *Modeling and optimization of a floating triangular platform used for nano and microforces sensing*, Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems – IROS'07, pp 1118-1123, USA, 29 oct. – 2 nov. 2007.
- [6] A. Cherry, E. Piat, J. Abadie, *Analysis of a passive microforce sensor based on magnetic springs and upthrust buoyancy*, Sensors & Actuators: A. Physical, 169 (2011), pp. 27-36 .
- [7] A. Cherry, E. Piat, J. Abadie, *Estimation robuste par synthèse H2 de micro- et nanoforce à l'aide de ressorts magnétiques actifs*, Journal Européen des Systèmes Automatisés – JESA, vol. 44, n° 6 (2010), pp 631-659.
- [8] A. Cherry, *Etude, conception et optimisation d'une plate-forme de mesure de micro et nano force par flottaison magnétique*, thèse de doctorat de l'Université de Franche Comté soutenue le 4 juin 2009.
- [9] J. Dejeu, J. Abadie, E. Piat, P. Rougeot, S. Oster, Ph. Stempflié, J. Takadoum (2010), *Development of a New Nanotribometer with Multi-Asperity Contact*, Proc. of the 14th Nordic Symposium on Tribology – Nordtrib 2010, paper 23, 9 pages.
- [10] J. R. Pratt, D. T. Smith, D. B. Newell, J. A. Kramar, and E. Whitenon, *Progress toward système international d'unités traceable force metrology for nanomechanics*, J. Mater. Res., vol. 1, pp. 366–379, Jan 2004.
- [11] M. Sepaniak, P. Datskos, N. Lavrik, and C. Tipple, *Microcantilever transducers: A new approach in sensor technology*, Analytical chemistry, pp. 568–575, November 2002
- [12] P. Rougeot, S. Régnier, and N. Chaillet, *Forces analysis for micromanipulation*, Proceedings 2005 IEEE international symposium on computational intelligence in robotics and automation, espoo, Finland, pp. 105-110, june 2005.
- [13] M. Girot, M. Boukhalel, and S. Régnier, *Towards a non-destructive in vitro biomechanical characterization*, ASM - IEEE EMBS Conference on Bio-, Micro- and Nanosystems, San Francisco, USA, janvier 2006.
- [14] F. Arai, D. Andu, Y. Nonoda, T. Fukuda, H. Iwata, and K. Itoigawa, *Micro end-ector with micro pyramids and integrated piezoresistiveforce sensor*, proc. of int. conf on intelligent robots and systems, IROS 96, vol. 2, pp. 842-849, 1996.
- [15] S. Muntwyler, F. Beyeler, and B. J. Nelson, *Three-axis micro-force sensor with sub-micro-newton measurement uncertainty and tunable force range*, Journal of Micromechanics and Microengineering, 20 (2010).
- [16] Y. Fujii, *Method for generating and measuring the micro-newton level forces*, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 20, pp. 1362-1371, 2006.

D LISTE DES LIVRABLES

Quand le projet en comporte, reproduire ici le tableau des livrables fourni au début du projet. Mentionner l'ensemble des livrables, y compris les éventuels livrables abandonnés, et ceux non prévus dans la liste initiale.

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
S2 2008	1	action de formation 1	formation scientifique	<u>AS2M</u>	bénéficiaire : D. Marsaut (ingénieur chez STIL)
S1 2008	2	simulateur capteur par lévitation	logiciel	<u>AS2M</u>	transféré chez STIL
S1 2009	3	capteur par lévitation	prototype + rapport de mise en oeuvre	<u>AS2M</u> + STIL	transféré chez STIL
S1 2011	4	station de caractérisation de raideur	prototype	AS2M + <u>STIL</u>	disponible sur la pré-version industrielle
S1 2010	5	évaluation des performances du capteur par lévitation	rapport sous forme de publication	<u>AS2M</u>	Publication acceptée si anglais révisé
S2 2009	6	action de formation 2	formation scientifique	<u>AS2M</u>	bénéficiaire : D. Marsaut (examinateur thèse Ali Cherry)
S1 2008	7	simulateur capteur par flottaison en version passive et active	logiciel	<u>AS2M</u>	disponible mais non transféré chez STIL
S2 2009	8	thèse Ali Cherry	mémoire	<u>AS2M</u>	
S1 2010	9	capteur par flottaison en version passive	prototype	<u>AS2M</u> + STIL	fonctionnel mais non transféré chez STIL
	10	capteur par flottaison en version active	prototype	<u>AS2M</u> + STIL	non fonctionnel
S1 2010 S2 2010 S1 2011	11	essais de caractérisation	rapport sous forme de publications	<u>AS2M</u> + MN2S + IBCT	certaines essais ne sont pas encore publiés car demandant davantage d'investigations
	12	Prospective marché et étude des besoins clients	Rapport	STIL	Non effectué
S2 2010	13	Cahier des charges pour le développement des versions industrielles	Rapport	AS2M + MN2S + IBCT + <u>STIL</u>	effectué uniquement pour le capteur par lévitation. MN2S et IBCT n'ont pas participé à cette action
S1 2011	14	Pré-version industrielle	prototypes	AS2M + <u>STIL</u>	effectué uniquement pour le capteur par lévitation.

E IMPACT DU PROJET

Ce rapport rassemble des éléments nécessaires au bilan du projet et plus globalement permettant d'apprécier l'impact du programme à différents niveaux.

E.1 INDICATEURS D'IMPACT

Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)

Comptabiliser séparément les actions monopartenaies, impliquant un seul partenaire, et les actions multipartenaires résultant d'un travail en commun.

Attention : éviter une inflation artificielle des publications, mentionner uniquement celles qui résultent directement du projet (postérieures à son démarrage, et qui citent le soutien de l'ANR et la référence du projet).

		Publications multipartenaires	Publications monopartenaies
International	Revue à comité de lecture		RI1, RI2, RI3
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	CI3	CI1, CI2, CI4, CI5, CI6
France	Revue à comité de lecture		RN1
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)		CN1
Actions de diffusion	Articles vulgarisation		
	Conférences vulgarisation		
	Autres		

Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)

Ce tableau dénombre et liste les brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet, du savoir faire, des retombées diverses en précisant les partenariats éventuels. Voir en particulier celles annoncées dans l'annexe technique).

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
Brevets internationaux obtenus	
Brevet international en cours d'obtention	
Brevets nationaux obtenus	
Brevet nationaux en cours d'obtention	
Licences d'exploitation (obtention / cession)	
Créations d'entreprises ou essaimage	
Nouveaux projets collaboratifs	projet région FIMICAP
Colloques scientifiques	CS1, CS2, CS3
Autres (préciser)	

E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Répertorier les publications résultant des travaux effectués dans le cadre du projet. On suivra les catégories du premier tableau de la section E1 en suivant les normes éditoriales habituelles. En ce qui concerne les conférences, on spécifiera les conférences invitées.

Revues internationales à comité de lecture

- [RI1] A. Cherry, E. Piat, J. Abadie, *Analysis of a passive microforce sensor based on magnetic springs and upthrust buoyancy*, Sensors & Actuators: A. Physical, 169 (2011), pp. 27-36
- [RI2] Philippe Stempflié, Jamal Takadoum, *Multi-asperity nanotribological behavior of single-crystal silicon: Crystallography-induced anisotropy in friction and wear*, Tribology international (2011), in press
- [RI3] J. Abadie, E. Piat, S. Oster, M. Boukallel, *Modelling and experimentation of a passive nanoforce sensor based on diamagnetic levitation*, Sensors & Actuators: A. Physical, 31 pages, accepté sous condition de révision de l'anglais (en cours).

Revue en soumission :

E. Piat, J. Abadie, S. Oster, *Nanoforce estimation with trade-off between bandwidth and resolution applied to a force sensor based on diamagnetic levitation*, Sensors & Actuators: A. Physical, 15 pages double colonnes, en attente de révision.

Communications internationales

- [CI1] E. Piat, J. Abadie, S. Oster, *Nanoforce estimation with Kalman filtering applied to a force sensor based on diamagnetic levitation*, Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems – IROS'2011, Sept. 25-30, 2011, San Francisco, 6 pages, accepted
- [CI2] Ph. Stempflié, J. Takadoum, R. Kouitat Njiwa, *An accurate in-situ wear assessment in micro/nanotribology*, proc. of 3rd European Conference on Tribology, June 7-9, 2011, Vienna, Austria, paper 271
- [CI3] J. Dejeu, J. Abadie, E. Piat, P. Rougeot, S. Oster, Ph. Stempflié, J. Takadoum (2010), *Development of a New Nanotribometer with Multi-Asperity Contact*, Proc. of the 14th Nordic Symposium on Tribology – Nordtrib 2010, paper 23, 9 pages
- [CI4] Ph. Stempflié, J. Takadoum, *Micro/Nanotribological studies of silicon and CNx coatings: Crystallography-induced anisotropy in friction and seizure*, Proc. of the 14th Nordic Symposium on Tribology – Nordtrib 2010, paper 18, 10 pages
- [CI5] A. Cherry, J. Abadie, E. Piat, *Microforce sensor for microbiological applications based on a floating-magnetic principle*, Proc. of the IEEE International Conference of Robotics and Automation – ICRA'07, pp 10-14, Italie, 10-14 avril 2007
- [CI6] A. Cherry, J. Abadie, E. Piat, *Modeling and optimization of a floating triangular platform used for nano and microforces sensing*, Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems – IROS'07, pp 1118-1123, USA, 29 oct. – 2 nov. 2007

Nota : C5 et C6 ont été présentés après soumission du projet à l'appel PSIROB 2007 mais avant son acceptation. Les travaux présentés concernent directement le projet STIL μ FORCE et n'ont pas été « dupliquées » dans d'autres communications internationales.

Revues nationales à comité de lecture

[RN1] A. Cherry, E. Piat, J. Abadie, *Estimation robuste par synthèse H2 de micro- et nanoforce à l'aide de ressorts magnétiques actifs*, Journal Européen des Systèmes Automatisés – JESA, vol. 44, n° 6 (2010), pp 631-659.

Communications nationales

[CN1] S. Oster, E. Piat, J. Abadie, *STIL μ FORCE : Développement d'un capteur de micro et nanoforce par lévitation diamagnétique*, Colloque CMOI 2010 – Méthodes et techniques optiques pour l'industrie, 7 pages, 15-19 nov. 2010, Toulouse.

Soumis :

C. Amiot, J. André, T. Zver, C. Pieralli, G. Knott, B. Wacogne, C. Roux, *Evaluation du degré de maturation cytoplasmique des ovocytes humains par spectrophotométrie en lumière blanche*, 16èmes journées de la Fédération Française d'Etude de la Reproduction, 21-23 sept. 2011, Toulouse

Nota : Une partie des résultats soumis dans ce résumé ont été produit avec du matériel (polscope) acquis par le partenaire IBCT (C. Roux) avec le financement de ce projet.

E.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

La liste des éléments de valorisation inventorie les retombées (autres que les publications) décomptées dans le deuxième tableau de la section E1. On détaillera notamment :

- brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet.
- logiciels et tout autre prototype
- actions de normalisation
- lancement de produit ou service, nouveau projet, contrat,...
- le développement d'un nouveau partenariat,
- la création d'une plate-forme à la disposition d'une communauté
- création d'entreprise, essaimage, levées de fonds
- autres (ouverture internationale,..)

Elle en précise les partenariats éventuels. Dans le cas où des livrables ont été spécifiés dans l'annexe technique, on présentera ici un bilan de leur fourniture.

Développement nouveau partenariat scientifique :

Projet région FIMICAP (fiabilisation du micro-assemblage et mise au point de capteurs intelligents par ingénierie des surfaces), Durée 3 ans, partenaires : femto-st, UTINAM, LERMPS, LCPR-AS, financement alloué : 190 k€, démarrage sept 2011.

Colloques scientifiques

[CS1] E. Piat, *Projet ANR STIL μ FORCE – Bilan à 3 ans*, Colloque ANR Contenus interaction et robotique, 11-12 janv. 2011, Paris, France

[CS2] J. Abadie, *Les moyens de mesures de micro et nanoforces du département AS2M pour la caractérisation des interactions entre micro-objets*, Journée thématique Fonctionnalisation et caractérisation de surface pour les microsystèmes entre l'institut femto-st et l'institut Utinam, 3 juillet 2009, Besançon, France.

[CS3] A. Cherry, J. Abadie, E. Piat, *Estimation de micro et nano-force en régime dynamique à l'aide de dispositifs magnétiques passifs et actifs*, Journées des GDRs Robotique, MACS et MNS, 22-23 janvier 2009, Besançon, France

E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Ce tableau dresse le bilan du projet en termes de recrutement de personnels non permanents sur CDD ou assimilé. Renseigner une ligne par personne embauchée sur le projet quand l'embauche a été financée partiellement ou en totalité par l'aide de l'ANR et quand la contribution au projet a été d'une durée au moins égale à 3 mois, tous contrats confondus, l'aide de l'ANR pouvant ne représenter qu'une partie de la rémunération de la personne sur la durée de sa participation au projet.

Les stagiaires bénéficiant d'une convention de stage avec un établissement d'enseignement ne doivent pas être mentionnés.

Les données recueillies pourront faire l'objet d'une demande de mise à jour par l'ANR jusqu'à 5 ans après la fin du projet.

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
Henry Pascal	H	Pascal.henry@uha.fr	2/2/2011	Doctorat	Besançon, France	Thèse (3 ans)	ENSMM	Ingénieur de recherche	7 mois	31/08/2010	CDD	IUT Mulhouse	ATER	non	non
Dejeu Jérôme	H	jerome.dejeu@univ-fcomte.fr	20/07/11	Doctorat de Chimie	France	Post-Doc (1an) ATER (1 an)	ENSMM	Ingénieur de recherche	4 mois	31/12/11	CDD	CNRS	Chercheur	Non	non
Oster Stéphane	H	stephane.oster@ens2m.fr	20/07/11	Diplôme d'ingénieur	Besançon, France		ENSMM	Ingénieur de recherche	10 mois	31/08/09	Thèse Cifre	PME/TPE	Chercheur	oui	oui
Cherry Ali	H	inconnue	07/10	Doctorat	Lyon, France	Thèse (3,5 ans)	ENSMM	Ingénieur de recherche	12 mois	30/08/09	1 an de post-doc à Bourges à l'institut PRISME puis sans nouvelles	inconnu	inconnu	non	non
Chen Qiao	H	inconnue	9/05/11	Doctorat	hors UE	Thèse	ENSMM	Ingénieur de recherche	3 mois	31/12/09	CDI	Grande entreprise en Chine puis start-up en Chine	ingénieur	non	non

Aide pour le remplissage

(1) Adresse email : indiquer une adresse email la plus pérenne possible

- (2) **Poste dans le projet** : post-doc, doctorant, ingénieur ou niveau ingénieur, technicien, vacataire, autre (préciser)
- (3) **Durée missions** : indiquer en mois la durée totale des missions (y compris celles non financées par l'ANR) effectuées sur le projet
- (4) **Devenir professionnel** : CDI, CDD, chef d'entreprise, encore sur le projet, post-doc France, post-doc étranger, étudiant, recherche d'emploi, sans nouvelles
- (5) **Type d'employeur** : enseignement et recherche publique, EPIC de recherche, grande entreprise, PME/TPE, création d'entreprise, autre public, autre privé, libéral, autre (préciser)
- (6) **Type d'emploi** : ingénieur, chercheur, enseignant-chercheur, cadre, technicien, autre (préciser)
- (7) **Lien au projet ANR** : préciser si l'employeur est ou non un partenaire du projet
- (8) **Valorisation expérience** : préciser si le poste occupé valorise l'expérience acquise pendant le projet.

Les informations personnelles recueillies feront l'objet d'un traitement de données informatisées pour les seuls besoins de l'étude anonymisée sur le devenir professionnel des personnes recrutées sur les projets ANR. Elles ne feront l'objet d'aucune cession et seront conservées par l'ANR pendant une durée maximale de 5 ans après la fin du projet concerné. Conformément à la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée, relative à l'Informatique, aux Fichiers et aux Libertés, les personnes concernées disposent d'un droit d'accès, de rectification et de suppression des données personnelles les concernant. Les personnes concernées seront informées directement de ce droit lorsque leurs coordonnées sont renseignées. Elles peuvent exercer ce droit en s'adressant l'ANR (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Contact>).