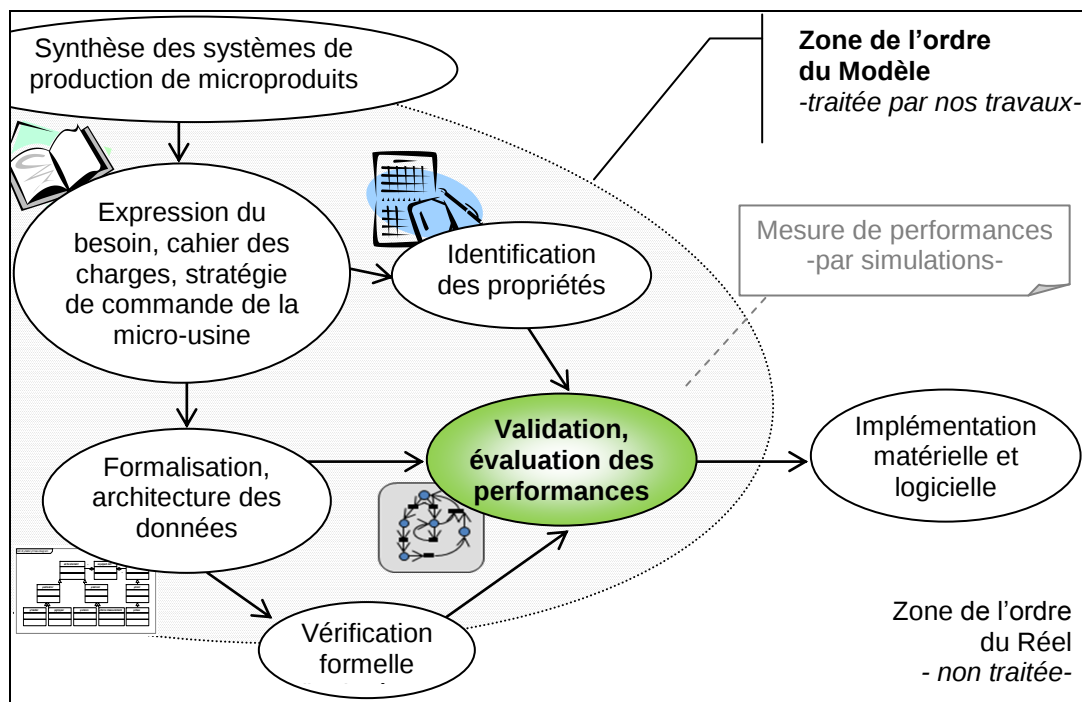


Mise en œuvre de la validation du pilotage

Ayant identifié les principaux paramètres intervenant dans la mise en œuvre d'une micro-usine, il faut dorénavant procéder à l'analyse de la dynamique d'évolution de ce système de production, et ce, sans perdre de vue l'environnement d'utilisation. En effet, le contexte principal de modularité est primordial dans le développement du système. Puisque la micro-usine est confrontée successivement à de nouveaux microproduits, le système d'information sera sans cesse amené à perfectionner les connaissances acquises. Les savoir-faire correspondants sont eux aussi potentiellement extensibles à l'infini.

Pour que les simulations de validation soient réalistes, il est primordial d'initialiser le système avec des valeurs aussi proches que possible des actuelles connaissances de micromanipulation et micro-assemblage télé-opérés voire automatisés - aussi rares mais riches soient-elles -. La maîtrise du contexte expérimental va ainsi conduire à définir les conditions initiales de nos simulations de validation.

Dans ce chapitre, nous glissons vers la dernière étape de nos travaux. En reprenant le schéma sur la méthodologie suivie, nous abordons l'étape de validation de la modélisation.



4.1 - Méthodologie de travail, étape de validation

Cette validation consiste à traduire de manière quantifiable les principales propriétés attendues – en termes de connaissance et de durée -, puis à comparer le résultat de simulations par réseau de Petri aux résultats expérimentaux menés au sein du laboratoire et de son homologue Suisse de l'EPFL.

Techniquement, l'outil numérique utilisé est le logiciel de développement PACE, de chez IBE Simulation Engineering GmbH [[pace](#)], qui permet la mise en œuvre de réseaux stochastiques et T-temporisés - le franchissement d'une Transition pondère une variable associée au temps -.

L'aspect stochastique est nécessaire pour ajouter l'indéterminisme du micromonde et se traduit par le réglage d'un paramètre de probabilité lors des tirs des transitions. La progression du réseau peut être personnalisée par une programmation interne à chaque transition en langage Smalltalk. Ce dernier, initié dans les années 1970, est toujours développé. Il est orienté objet et il est réflexif, c'est-à-dire qu'il a la capacité d'examiner, et éventuellement de modifier, ses structures internes de haut niveau - telles que ses objets - lors de son exécution.

Il possède l'avantage d'être dynamiquement typé, autrement dit le type d'une donnée n'est pas associé au symbole de la variable utilisée mais il est encodé dans la donnée elle-même. Cette caractéristique apporte un grand confort de programmation pour celui qui n'est pas expert en POO.

L'expérience acquise ces dernières années en micro-manipulation et micro-assemblage par les acteurs majeurs du Laboratoire Européen Associé Microtechnique - notre laboratoire et l'EPFL - sert de point de départ à nos simulations.

4.1 Contexte expérimental

Les simulations de validation de l'architecture des données que nous proposons ici doivent être initialisées par des valeurs réalistes. Pour cela, nous choisissons d'utiliser une analyse des premières manipulations effectuées en télé-opération. Ce retour d'expériences nous a permis l'identification des principaux paramètres : temporels, taux de réussite expérimentale – connaissance, savoir-faire -.

Au sein de l'équipe SAMMI, de nombreuses télé-opérations ont été tentées dans le cadre du projet PRONOMIA - PRincipe et Outils NOuveaux pour le Micro-assemblage Automatisé : une alternative par le milieu liquide - [Pro05, GauM07c]. La finalité de ce projet ANR - projet de recherche collaborative entre l'ISIR (Paris) et FEMTO-ST, dont la durée s'est établie entre décembre 2005 et novembre 2008 - était de proposer une approche innovante à travers la réalisation de tâches de micro-assemblage dans un environnement liquide. L'idée principale était que les multiples effets perturbateurs, relativement aléatoires, sont sensiblement diminués par l'immersion des microcomposants dans de l'eau. Cette approche est nouvelle et permet l'exploration d'une méthode différente de celles qui interviennent habituellement dans l'atmosphère gazeuse terrestre ou sous vide.



A l'issue de ce projet, de nouvelles difficultés sont apparues, liées à l'interface entre l'atmosphère et cet environnement liquide. Nous ne rentrerons pas ici dans ces détails éloignés de notre sujet. En revanche, d'importants progrès ont été réalisés sur plusieurs aspects nous concernant.

Nous retiendrons, d'une manière générale, plusieurs avancées dans les domaines de la vision [BerJ06, BerJ07, Tam08, Tam09] et de la préhension de micro-objets en milieu liquide [Low08].

A cet titre, les travaux de David Hériban, ingénieur de recherche CNRS au laboratoire depuis le début du projet PRONOMIA, nous sont doublement utiles : d'une part, ce dernier a, en Programmation Orientée Objet, développé une interface de télé-pilotage modulaire répondant à l'acronyme AP2M pour « Application pour le

Pilotage de MicroManipulations » [\[Hér07\]](#) ; d'autre part, en trois années de travail sur la station télé-opérée PRONOMIA, il a acquis une expérience certaine en micromanipulation et micro-assemblage [\[Gen10\]](#), notamment en atmosphère libre - donc légèrement en marge de la problématique initiale de PRONOMIA -.

Ce sont ses expériences qui servent de base à l'ensemble de nos simulations. La richesse de ses expérimentations, de ses interventions et la diffusion sans réserve de ses acquis ont joué un rôle important dans notre analyse du système d'information adapté à l'évolution d'une micro-usine. Soulignons qu'à travers sa recherche, il s'agissait pour cet ingénieur de communiquer non pas sur la facilité de certaines réussites, mais principalement de faire état de ses difficultés voire de ses échecs. Ces proportions entre réussites et échecs nous sont indispensables pour quantifier le plus justement possible l'initialisation de nos simulations. En effet, sans une telle connaissance de terrain du micromonde au sein du laboratoire, il nous aurait été impossible de maîtriser de tels ordres de grandeurs puisque le micromonde est justement imprévisible pour le commun des scientifiques inhabitué à cette physique hors norme.

Une seconde plateforme de manipulation, appelée SAMMI comme l'équipe de recherche, dont le développement a été initié par Benoît Ballarin et poursuivi par Brahim Tamadazte, nous sert de seconde base expérimentale pour l'approche automatique.

Appréhendons maintenant les rapports d'expérimentations définissant par la suite les conditions initiales à l'extrapolation du comportement d'une micro-fabrication dans une micro-usine simulée grâce aux réseaux de Petri.

4.1.1 Première base expérimentale

Une première base de travail concerne la manipulation et l'assemblage de μ -composants de géométrie simple. Les pièces de $40 \times 40 \times 5 \text{ } \mu\text{m}^3$ sont fines, plates, d'épaisseur constante et leur contour est globalement carré. Seules quelques encoches profondes, légèrement plus larges que l'épaisseur - en théorie -, taillées sur la tranche des flancs des pièces, permettent la solidarisation des pièces entre-elles.

Mécaniquement, le principe d'assemblage est inspiré du mésomonde. Il consiste à mettre en position grâce à des surfaces de contact complémentaires. Ces surfaces de contact apparaissent lors de l'insertion entre deux encoches pour lesquelles on a pris soin d'introduire un jeu fonctionnel « infime », et donc relativement aléatoire à cette échelle, compte-tenu du procédé de fabrication - succession d'étapes d'épithaxie, résinage, photolithographie et attaques sèches ou humides -. On rencontre ici un premier risque lié à l'incertitude de la largeur de la ou des fente(s) face à l'épaisseur du microcomposant.



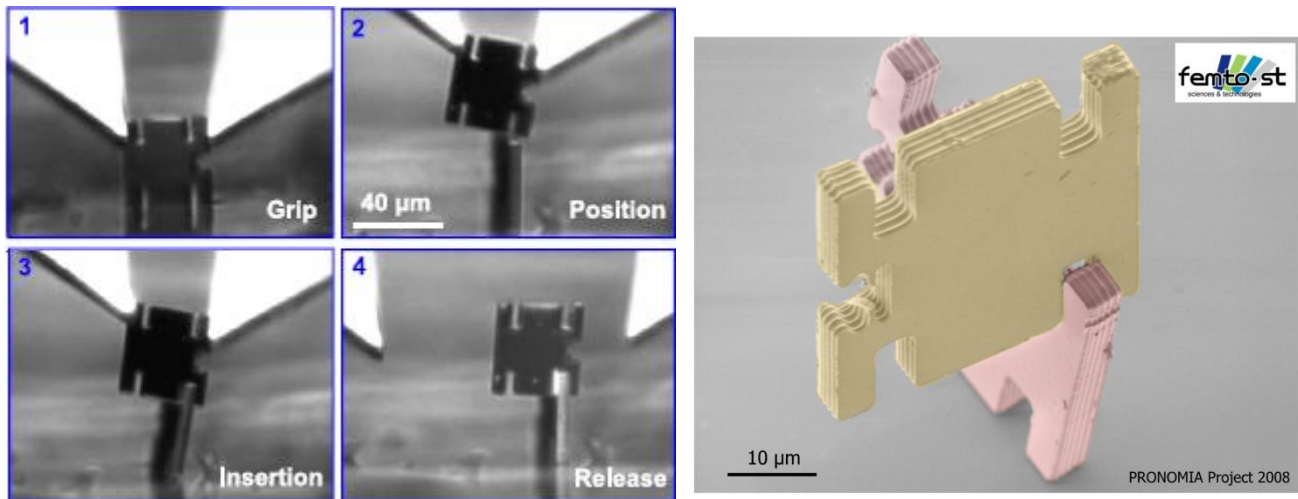
4.2 - Assemblage complet simulé de microcomposants à doubles encoches

En cours d'insertion, la géométrie des surfaces de contact n'autorise globalement qu'un mouvement de translation orienté par l'axe des fentes qui, dans la mesure du possible, doivent être bien alignées. En quelque sorte, nous sommes en présence d'une liaison glissière.

Enfin, lorsque l'insertion fait apparaître un contact entre les fonds des deux encoches, cette butée encastre les microcomposants de façon a priori instable, démontable ; elle est finalement définitive compte-tenu des forces d'adhésion qui apparaissent à travers les multiples contacts.

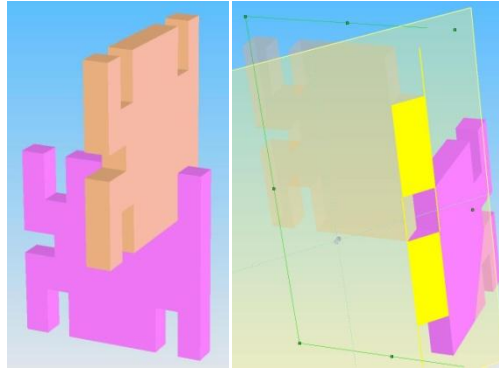
Nous pourrions effectivement penser que l'assemblage obtenu est instable et risque de se désolidariser compte-tenu d'un arrêt uniquement unidirectionnel au fond des encoches. Mais ne perdons pas de vue qu'à cette échelle, les masses deviennent négligeables au regard des efforts surfaciques et, de ce fait, la réversibilité du

mouvement dans cette liaison glissière n'est pas effective. Selon la qualité de la réalisation des surfaces ici fonctionnelles et de l'ajustement – jeu - en présence, les efforts surfaciques de contact limitent la qualité de l'assemblage ; les frottements responsables sont probablement dûs aux forces de serrage, capillaires et de Van-der-Waals. L'image suivante d'un tel micro-assemblage obtenu sur une station de notre laboratoire illustre mes propos puisque l'on observe une liaison mécanique dite « complète » bien que l'insertion, elle, soit incomplète. A ce titre, nous pouvons observer que l'insertion a abouti jusqu'à ce que le fond d'une entaille interfère avec le bord de l'autre microcomposant, diminuant ainsi de moitié l'emboîtement, mais surtout réalisant un micro-assemblage sans être réellement en présence de surfaces géométriquement complémentaires - comme cela est le cas dans le mésomonde -.



4.3 - Assemblage expérimental incomplet de doubles encoches

L'observation en coupe de la modélisation nous amène à découvrir, compte-tenu de la cavité ainsi créée, la mise en correspondance de huit arêtes dans cet assemblage. Nous pouvons donc envisager plusieurs hypothèses : soit des forces de type électrostatiques maintiennent l'équilibre de ce micro-assemblage grâce à des charges accumulées sur les arêtes, soit l'humidité ambiante crée des efforts dûs aux tensions de surface, soit la micro-tribologie causée par un serrage dû à un jeu fonctionnel négatif assure une adhérence.



4.4 – Simulation d'assemblage rigide bien qu'incomplet de doubles encoches

Soulignons également que, lors de l'insertion, le frottement avec glissement entre les pièces au niveau des arêtes, induit l'apparition des charges électrostatiques.

Pour parvenir à l'assemblage par encoches de deux microcomposants, il a fallu monter en compétences sur :

- les actionneurs susceptibles de générer des déplacements micrométriques avec des forces de quelques microNewton,
- le système de contrôle commande de ces actionneurs,
- le profil des surfaces du préhenseur amenées au contact : des constituants interchangeables, appelés organes terminaux, étant fixés sur les actionneurs,
- le support amené à recueillir les microcomposants orientés, puis l'assemblage ; ce support est un plan possédant de grandes propriétés d'adhérence,
- la chaîne d'information permettant le retour d'informations visuelles par une à trois caméras et leur optique à fort zoom - mais faible profondeur de champ -.

Finalement, nous observons que la mise en œuvre de tels équipements requiert beaucoup de temps pour leur développement - se compte en années -, leur intégration - se compte en semaines voire en mois -, leurs réglages - se compte en heures voire en jours -.

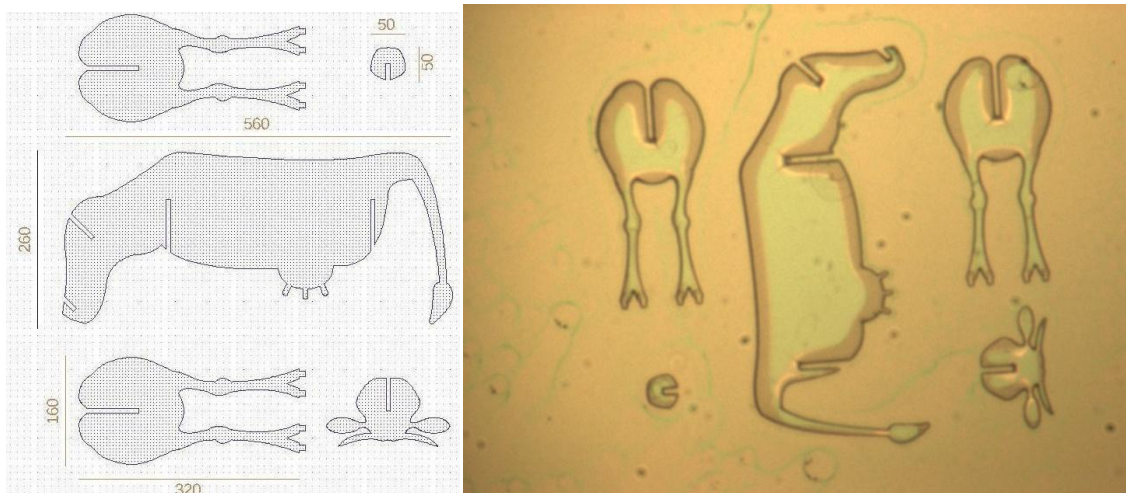
Une fois la station de télé-opération fonctionnelle, les manipulations sont très lentes – par crainte de casse des organes terminaux -, les accélérations importantes conduisent à des pertes de pièces qui sortent du champ de vision. La dépose devient aléatoire car les microcomposants « collent » aux doigts de la pince. Pour parvenir à manipuler correctement un microcomposant, il faut souvent s'y prendre en plusieurs fois ; il n'est pas rare de devoir procéder à une dizaine de tentatives pour une réussite.

L'aboutissement plutôt spectaculaire de cette approche a été, à l'automne 2008, le micro-assemblage de cinq microcomposants.

Plusieurs prouesses sont à mettre à l'honneur de cette première mondiale :

- la taille des pièces :
 - o Diversité des dimensions - en surface, la plus petite mesure le soixantième de la plus grande - ;
 - o Faible épaisseur de 5 μm ;
- leur nombre, puisque ce sont quatre microcomposants qui ont pris place sur un cinquième ;
- des insertions bidirectionnelles sur une même pièce nécessitant un retournement ;
- des insertions en oblique, à 45° ;
- des chaînes cinématiquement fermées et ouvertes ;
- la stabilité du positionnement hyperstatique sur quatre pieds ;
- un temps d'assemblage record ; réalisé en à peine moins d'**une heure**, en incluant les prises de pièces qu'il fallait désolidariser de leur substrat.

Soulignons enfin que ce micro-assemblage a été l'objet d'un prix à l'occasion du salon industriel et scientifique Micronora 2008, puisqu'un micron d'or a été décerné à l'équipe qui a travaillé sur la station de télé-opération du projet Pronomia.



4.5 – Aperçu des microcomposants à assembler pour Micronora, en clin d'œil régional

Rapport d'interview et analyse de la démarche de micromanipulation, micro-assemblage :

Les principales caractéristiques de ces micromanipulations suivies de micro-assemblages, décrites par D. Hériban, font apparaître les informations suivantes sur l'aspect principal d'une telle opération, à savoir réussir ou échouer :

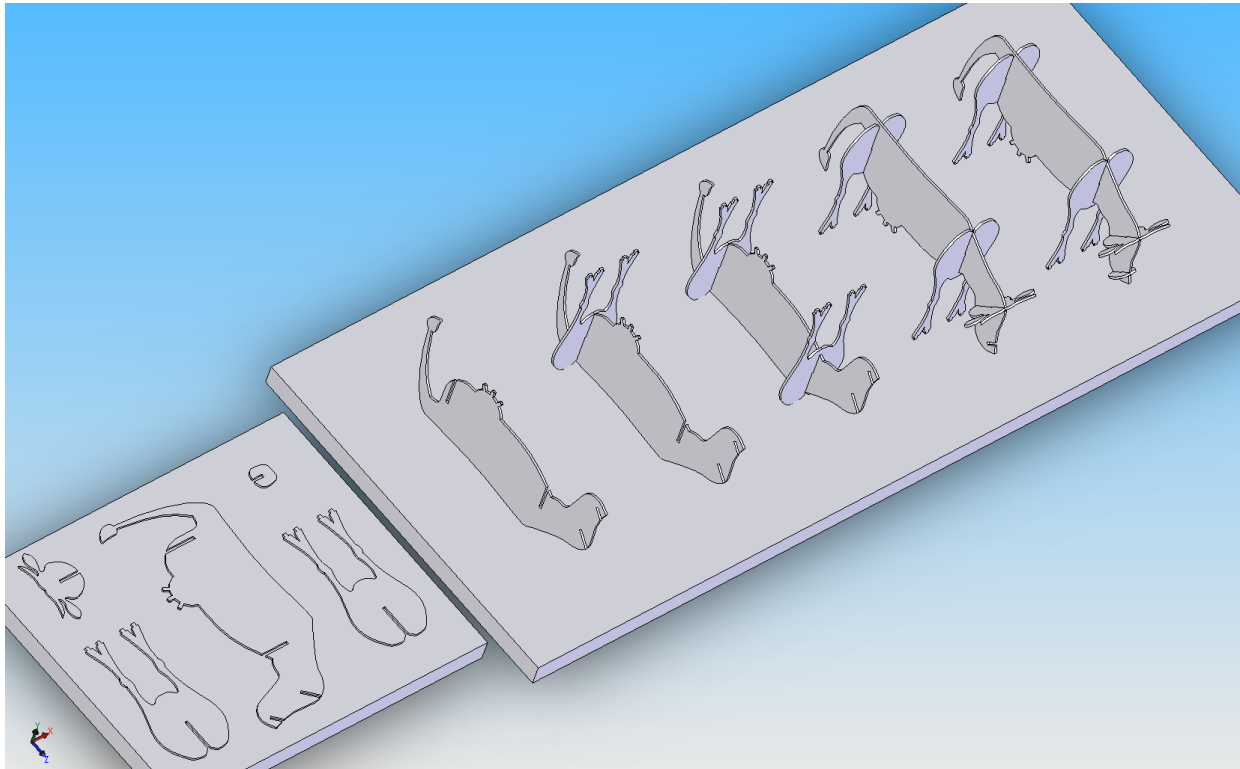
- Réussite, échec, aléas micromonde, savoir-faire :

La première partie de cette analyse permet de rapporter les principales données relatives à la micromanipulation et au micro-assemblage, vues à travers le filtre de la notion de réussite/échec. Les échecs provenant de l'apparition de phénomènes aléatoires imputables à la physique complexe du micromonde, leur inventaire aide au développement et à l'acquisition de nouveaux savoir-faire.

Pour parvenir à manipuler de tels microcomposants, il faut tout d'abord les séparer du substrat duquel ils sont solidaires. Les premiers essais pour décoller les microcomposants sont relativement médiocres puisqu'on compte en moyenne dix échecs pour une réussite. Les causes des échecs sont en général la casse de la pièce ou sa perte car elle saute au-delà du champ de vision des caméras. Puis, l'originalité du contexte liquide de PRONOMIA est intervenue pour permettre une impressionnante progression. En effet, dès lors que l'idée est apparue d'humidifier le contact entre les pièces à séparer, les proportions d'échecs ont fortement régressé avec **un rapport moyen de deux échecs pour une réussite**. Ainsi, l'usage d'alcool pour humidifier le contact entre les objets à séparer permet de passer d'un contexte d'efforts surfaciques de type Van der Waals à des efforts capillaires moindres, bien qu'augmentant le frottement de type visqueux. L'avantage dans l'utilisation de l'alcool concerne, notamment, son aptitude à s'évaporer relativement rapidement puisque, après séparation, le liquide disparaît de la surface en une trentaine de secondes.

Cette première étape de préhension du microcomposant est indispensable, et de penser à un tel artifice d'humidification de l'interface a fortement amélioré le comportement.

Après séparation du substrat, l'opération suivante consiste à transporter le microcomposant vers la zone d'assemblage en modifiant l'orientation de la pièce puis selon un cycle en U traditionnel dans les automatismes - montée, déplacement latéral, descente -. L'illustration suivante permet d'observer ces opérations et leur séquencement :



4.6- Micro-composants de la microvache et séquencement des opérations de micro-assemblage

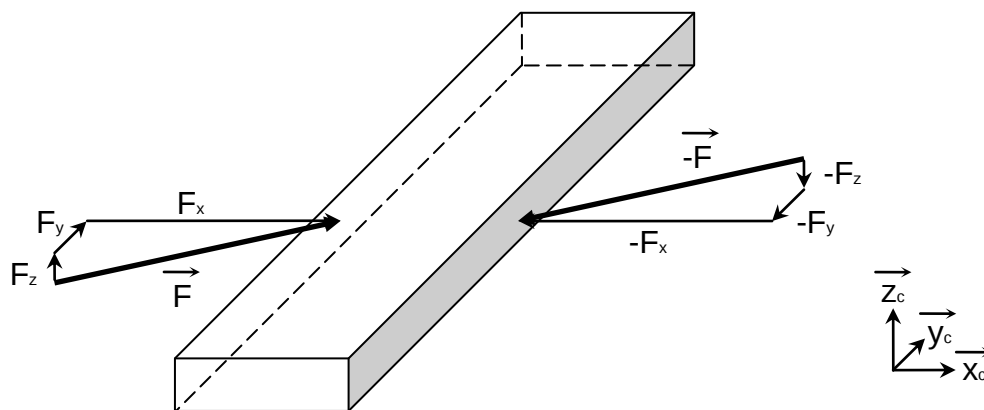
Les pièces étant par la suite assemblées par insertion entre les fentes précédemment décrites, et ne disposant que d'une unique micropince pour l'ensemble de la station, il s'agit de déposer le premier microcomposant afin de saisir le second. Dès lors, deux stratégies sont maîtrisées par notre laboratoire. La première consiste à appuyer la pièce positionnée sur la tranche contre un bloc parallélépipédique de Silicium, ce qui participe à la « Mise en position » de la pièce, démarche issue des méthodes usuelles en mécanique. La seconde solution habituellement utilisée revient à effectuer une sorte de « Maintien en position », lui aussi issu des méthodes du génie mécanique, par l'intermédiaire d'un « gel pack ». Cette substance déposée en surface de la zone d'assemblage crée une adhésion du microcomposant qui peut ainsi être lâché en toute confiance, sans crainte qu'il ne s'égaré en disparaissant du champ d'observation des diverses caméras.

Pour parvenir à assembler le second microcomposant, il est indispensable d'orienter la fente d'insertion du premier microcomposant, de sorte à pouvoir y glisser le

second. Or, lors du micro-assemblage, seul le second microcomposant est maintenu par la micropince. Il s'agit donc d'orienter le premier microcomposant perpendiculairement à la surface de la zone de travail. Dans le mésomonde cette position serait un équilibre instable mais à l'échelle micro le faible volume et donc la masse négligeable autorise l'idée de poser une pièce sur sa tranche.

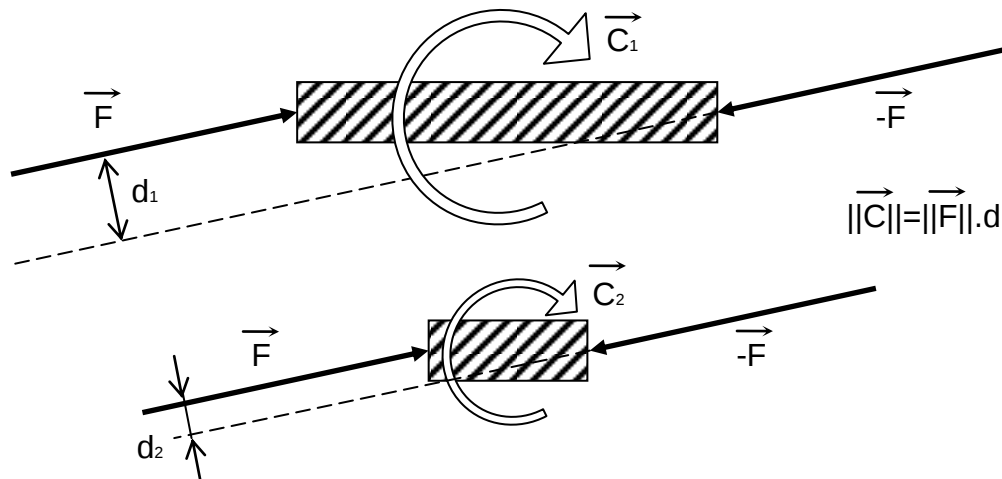
Ce changement d'orientation entre la prise de la pièce, à l'occasion de sa séparation du substrat, et sa dépose sur la zone d'assemblage est source d'un nouveau savoir-faire. Après avoir glissé les doigts de la micropince sous le microcomposant pour le décoller du substrat, il s'agit de le saisir par pincement entre deux bords opposés. Pour une évidente question de stabilité de cette préhension, celle-ci s'effectue toujours par un serrage entre les deux côtés les moins éloignés.

Petit rappel mécanique : tout d'abord, un paramétrage minimal s'impose, soit (x_c, y_c, z_c) une base liée au microcomposant telle que z_c soit orientée selon la faible épaisseur de la pièce.



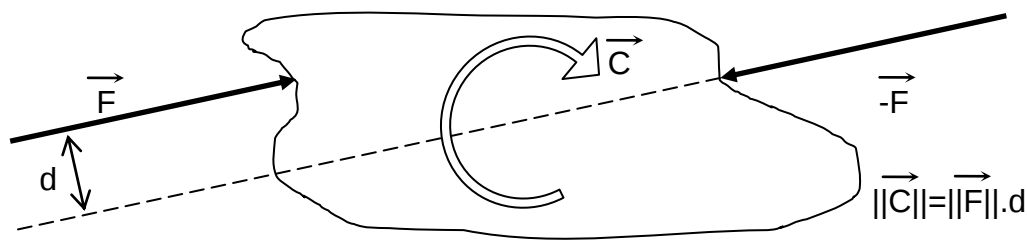
4.7 - Apparition d'un couple de basculement

Lorsqu'un objet est en équilibre sous l'action de deux forces en compression, d'orientation principale selon x_c , alors, pour un défaut d'alignement donné de ces deux forces dont la composante selon z_c serait non nulle, un couple de basculement apparaît, selon y_c avec le paramétrage choisi ; il est d'amplitude d'autant plus grande que les forces sont distantes, comme le confirme l'illustration de la figure suivante.



4.8 - Couple de basculement dépendant de la largeur

Une autre particularité apparaît avec les pièces de ce record historique d'assemblage de la microvache. Nous observons en effet que le contour des pièces n'est pas linéaire, ni discrétisé par des successions de segments rectilignes, mais il est arrondi en comportant des portions concaves et d'autres convexes dans le plan (x_c, y_c) . Ici également, la saisie est d'autant plus stable que les appuis ponctuels des extrémités des doigts de la micropince sont choisis au point de courbure maximale des bords concaves. Idéalement, les droites normales à la courbe du contour en chacun de deux points de serrage sont également confondues, afin de ne pas créer de couple équivalent de basculement. A ce titre, deux courbures sur des bords opposés, dont les normales ne seraient pas confondues induisent des composantes de force selon y_c , qui, en s'opposant l'une à l'autre, créent un couple selon z_c lequel induit une rotation du composant dans le plan (x_c, y_c) . Cette rotation est très vive car la pièce ayant très peu de moment d'inertie elle subit une d'autant plus d'accélération en rotation. Voici l'illustration du couple équivalent :



4.9 - Couple équivalent induisant une rotation –accélération angulaire-

La description précédente de la manipulation de prise de microcomposant fait apparaître une contradiction dans les étapes de « saisie-dépose » liée à l'orientation finale sur le gel-pack⁶ différente de celle sur le substrat de fabrication. Etant donné les difficultés déjà rencontrées pour extraire le microcomposant de la surface du substrat, il n'est pas pensable de déposer ensuite ce microcomposant directement à plat sur la surface adhésive du gel-pack, d'autant plus qu'il est ensuite nécessaire d'orienter les fentes d'insertion - et donc le microcomposant - dans un plan vertical à la surface de la zone de dépose. En conséquence, le microcomposant doit être réorienté par une rotation de 90° de sorte à être déposé sur la tranche. Dès lors, la prise idéale, y compris pour assurer un transport, avec un minimum de risque de perte de microcomposant, consisterait à pincer le microcomposant dans le sens de son épaisseur ; les doigts seraient orientés selon z_c . Cela est impossible au début du mouvement puisque le microcomposant est à plat sur un substrat, et, bien que l'on puisse glisser un doigt sous le microcomposant, on ne peut orienter ce dernier perpendiculairement à la surface. On le voit ici, la description de cette contradiction peut ouvrir quelques pistes de solutions : la première consiste à pré-orienter le substrat dans un plan vertical plutôt qu'horizontalement, et, idéalement, une entaille dans le substrat sous le microcomposant créerait un dégagement utile au placement d'un doigt de la micropince pour saisir la pièce selon son axe z_c .

Mais la solution technique adoptée est toute autre. Le téléopérateur a choisi de profiter de l'importante adhérence disponible sur le gel-pack. Ainsi, le microcomposant est couché, puis poussé par un doigt de la micropince par appui sur le bord comportant les encoches à assembler de sorte que le bord opposé adhère sur le gel-pack et accroche suffisamment pour permettre une rotation par le principe de basculement.

⁶ Il s'agit de la surface de travail recouverte d'un revêtement à forte adhésion (de type capillaire).

Lors de cette orientation, il se produit de l'ordre de une à trois chutes – échecs - pour parvenir à une orientation réussie.

Ensuite, les premières insertions, bien qu'orientées verticalement, ont échoué pour près de 80% lors des essais en raison d'un manque d'informations visuelles. Non seulement la focalisation n'était pas suffisante, mais il manquait également une vue pour appréhender correctement la géométrie spatiale de l'insertion. En effet, le mouvement final de translation n'est que la partie émergée de l'iceberg, puisqu'il nécessite de la précision sur cinq paramètres : deux de position pour aligner les « entrées » des fentes, puis trois d'orientations - angles d'Euler - pour aligner les surfaces planes devant s'emboîter. Il est également important de prendre la mesure de la relative qualité de la vision à cette échelle ; la transparence des pièces fines de 5 μm , les reflets qui donnent l'illusion de mirages et la faible profondeur de champ des optiques fournissent au final un rendu assez médiocre mais nécessaire à la connaissance du micromonde. L'amélioration des difficultés optiques et la résolution de l'absence d'une vue par ajout d'une caméra a permis d'inverser le rapport de proportionnalité des échecs en comparaison aux réussites en passant à 75 % d'insertion abouties.

Une autre illustration de l'imagination dont il faut faire preuve lors de telles micromanipulations concerne la phase d'orientation de la partie formant la tête de la microvache avec cornes et oreilles. Pour parvenir à insérer ce microcomposant - après avoir mis la bête sur ses pattes -, il était nécessaire d'orienter son plan principal parallèlement à l'encoche, elle-même inclinée à 45°. Ainsi, le téléopérateur a choisi de profiter de la relative mobilité en rotation qui subsiste entre les deux doigts de la pince et le microcomposant. Si l'on considère qu'à leur contact, une importante force ponctuelle avec frottement est générée, donc susceptible de s'incliner par rapport à la normale au plan tangent du contact ; cette dernière peut donc finalement être modélisée comme une liaison rotule tant qu'elle ne glisse pas. La modélisation par deux rotules du pincement induit une liaison pivot libre de tourner autour d'un axe passant par les deux points d'application des forces ponctuelles. La liberté de la mobilité de cette liaison est tout de même relative car les quelques frottements et efforts du micromonde en présence suffisent à immobiliser ce degré de liberté. Cependant, en choisissant de prendre appui avec ce microcomposant « tête » sur le museau du corps de la microvache, en un point excentré de l'axe de la liaison pivot induite par le pincement, le téléopérateur parvient

ensuite assez aisément à modifier l'inclinaison du microcomposant pour l'amener aux 45° nécessaires pour l'insertion du micro-assemblage.

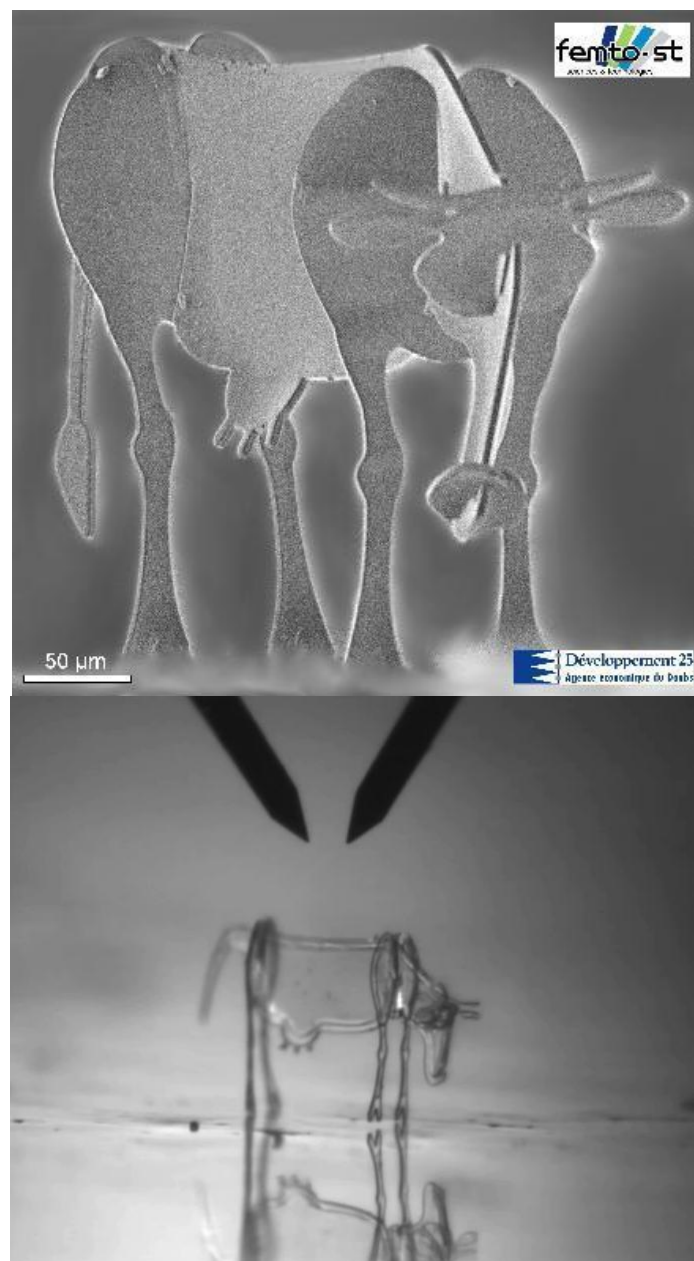
A première vue, cette démarche particulière donne ici au micro-sous-assemblage une fonction outillage, dont l'effet pourrait s'avérer dévastateur compte-tenu des efforts encaissés inutiles à son propre assemblage. En revanche, cette astuce possède un avantage indiscutable puisqu'elle évite d'avoir à introduire un micro-outillage - de type élément passif, en référence à la schématisation UML - spécifique à cette opération. Il aurait par ailleurs l'inconvénient non négligeable d'encombrer la zone d'assemblage et d'ainsi perturber les retours par imagerie indispensable à la télé-opération.

Un peu de rétro-ingénierie nous amène à noter que certaines surfaces - face, bord, arête, sommet - de microcomposants, sans fonctions techniques initiales, peuvent être recensées et dessinées de sorte à optimiser de telles opérations. Par exemple, sur la tranche de la pièce, une encoche assez peu profonde - concave et de grande courbure - permet le blocage d'un point du microcomposant à réorienter, en lui imposant son CIR - centre instantané de rotation -.

Au sujet de l'insertion à 45°, une autre observation est à inscrire à l'inventaire des savoir-faire issus de la fabrication de la microvache. Contrairement à l'évidence trompeuse que l'on pourrait penser de ce micro-assemblage par insertion entre deux fentes inclinées à 45°, le mouvement donné à la pièce mobile par les doigts de la pince en déplacement est en fait une succession alternée de pas sur les directions horizontale et verticale. Bien que l'interface de pilotage AP2M permette, par la synchronisation des deux déplacements correspondants aux mobilités initiales de la station, la définition d'un « axe virtuel » - qui serait justement incliné par exemple de 45° -, il n'a pas été nécessaire d'utiliser cet artifice. Le résultat de l'insertion est largement satisfaisant avec une technique d'alternance de mouvements conjugués. Dans le contexte actuel de production en très faible série, quasi-unitaire, cette stratégie a l'avantage d'économiser le temps qu'il aurait été nécessaire de consacrer à la configuration de cet axe virtuel.

Le temps, ou plutôt la durée d'une opération, est un nouveau paramètre à prendre en compte dans le contexte de la micro-usine. Faisons le point sur les ordres de grandeur des connaissances acquises par notre laboratoire à ce sujet compte-tenu de sa relativement bonne expérience de la micromanipulation et du micro-assemblage.

Auparavant, il est temps de concrétiser le résultat de cet assemblage ; pour le plaisir des yeux, pour l'originalité de la démarche, envers la Région Franche-Comté et la race bovine montbéliarde - dont on doit la reconnaissance à M. Jules Viette -, voici Miss Maghi - pour **Micro-AssemblaGe** d'un **HerbIvore** -.



4.10 - Vue MEB et microscope de la microvache assemblée - $0,16 \times 0,32 \times 0,56 \text{ mm}^3$ ep $5 \text{ }\mu\text{m}$ -

- **Durée, temps, pénalisation, accroissement du savoir-faire :**

Il faut compter entre une et deux minutes pour libérer un microcomposant du substrat. La durée de l'opération est globalement la même avec ou sans humidification de l'interface à l'alcool. En revanche, il y a près de 80 % d'échec en moins avec l'usage de l'alcool qui, c'est le revers de la médaille, pénalise le chronomètre car, à l'issue, il faut attendre de l'ordre de trente secondes que le liquide s'évapore en surface.

Une autre durée caractéristique concerne le délai pour parvenir à basculer le corps de la microvache à la verticale. Cette opération requiert en moyenne une minute pour une réussite, sachant qu'il se produit de l'ordre d'une à trois chutes - échecs - pour parvenir à une orientation réussie : **taux moyen de réussite de 33 %**.

La phase de micro-assemblage par insertion a connu une réduction remarquable de la durée de son opération : les premières tentatives ont requis une dizaine de minutes, alors qu'il ne fallut plus qu'une à deux minutes, une fois résolue la difficulté liée à la vision et à la qualité de ce retour d'information.

Attention cependant car l'ajout d'une caméra n'est pas une opération anodine. Non seulement l'optique est très encombrant étant donné les distances focales importantes à cette échelle, mais un tel changement dans la structure matérielle de la station de téléopération est à classer au rang de la réorganisation.

Ici, cette réorganisation ne pénalise pas beaucoup la mise en service de la production car elle n'a nécessité qu'une trentaine de minutes. Mais la durée requise pour une telle décision de réorganisation peut rapidement croître. Il faut, à titre d'exemple, compter entre une demi-journée et trois jours de travail si le codage d'un fichier source est à modifier. Ce peut être également une tâche de plus grande envergure durant une à trois années d'un doctorat si les équipements - matériels ou logiciels - indispensables au nouveau scénario doivent être développés.

Les actuels travaux menés par l'équipe SAMMI pour le développement de nouveaux capteurs de microforces, microactionneurs, microrobots, asservissements visuels, lois de commande en sont une concrète illustration - linéarisation, Hystérésis, vue virtuelle évitant l'encombrement d'une caméra supplémentaire et son optique -.

4.1.1.1 Synthèse des taux de réussite et des durées expérimentales

Les ordres de grandeur relatifs à la fabrication par assemblage de la microvache menée par David Hériban sont résumés dans le tableau suivant :

opérations de manipulation et d'assemblage	taux de réussite			durée			remarques
	maxi	moy	mini	maxi	moy	mini	
orientation par rotation due au basculement consécutif à une poussée et à une adhérence sur le bord opposé	50		25	2'		15s /manuel 2s / autom.	1 réussite pour 1 à 3 chutes (échecs)
insertion en orientation verticale mais manque d'informations visuelles (focalisation insuffisante et manque d'une vue pour géométrie spatiale)		20			10'		
insertion en orientation verticale avec informations visuelles (ajout d'une vue par une caméra supplémentaire)		75		2'	1'30s	1'	
réorganisation avec une caméra supplémentaire					30'		
réorganisation / modification d'un fichier source				3 j		1/2 j	
réorganisation / développement d'équipements (matériels, logiciels)				3 an		1 an	
libération d'un composant du substrat sans alcool		20		2'		1'	
libération d'un composant du substrat avec alcool		85		2'30"		1'30s	80% d'échec en moins ($0,8*0,8=0,64..+0,2$)
durée d'évaporation de l'alcool		100			30s		
basculement à la verticale	50		25		1'		
Assemblage des 5 microcomposants		100			1 h		

Pour mémoire :

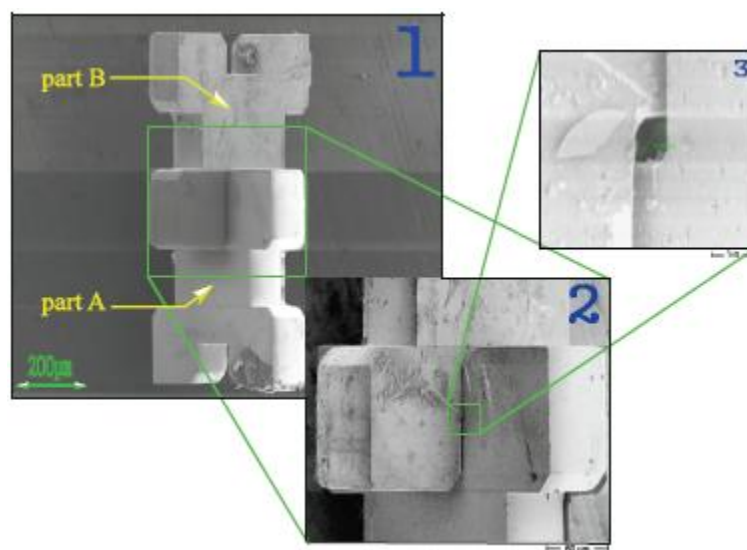
assemblage de quatre composants sur un cinquième	corps	pattes	tête	museau
taille des pièces d'épaisseur 5 µm	260*560	160*320	100*150	50*50
diversité des dimensions (ratio)	1/112	1/64	1/30	1/10
insertions bidirectionnelles avec retournement		oui		
insertions verticales et obliques à 45°			oui	oui

4.1.2 Deuxième base expérimentale

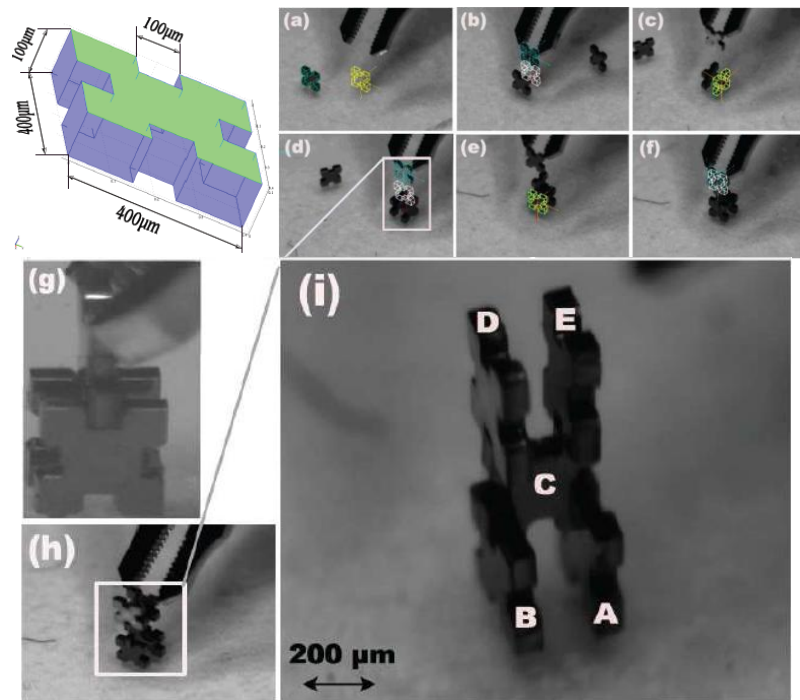
Après une longue période de travaux pour développer des outils de visualisation et d'assistance à l'insertion par asservissement visuel, mais en vue d'acquérir aussi une compétence spécifique sur l'assemblage de double encoches, l'équipe SAMMI du département AS2M de femto-st [[Tam08b](#), [Tam09a](#)] dispose d'un savoir-faire d'une grande précision, tel qu'illustré ci-après, avec un micro-assemblage formé de cinq microcomposants et d'une quadruple insertion de pièce de relative grande dimension $400 \times 400 \times 100 \mu\text{m}^3$. Cette prouesse a été possible également grâce à la présence de chanfreins d'insertion et d'un jeu fonctionnel beaucoup plus évident à contrôler à cette échelle, mais aussi d'un support d'insertion compliant qui évite la casse des doigts de la micropince. Tous ces artifices, issus de l'expérience acquise lors des précédentes campagnes expérimentales, autorisent dorénavant **100 % de réussite** à l'insertion en profondeur des encoches de cette taille.



4.11 – Aperçu du support d'insertion compliant - à trois ressorts –



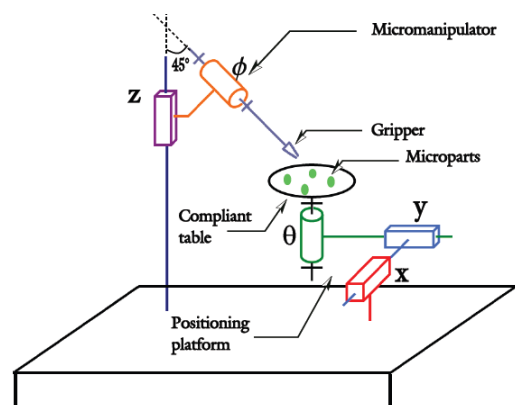
4.12 – Aperçu des chanfreins et du jeu d'insertion de $3 \mu\text{m}$ dans un assemblage à double encoche



4.13 - Assemblage complet et multiple de simples encoches par asservissement visuel

4.1.2.1 Synthèse des taux de réussite et des statistiques expérimentales

Lors de sa campagne d'expérimentation [Tam09b], Brahim Tamadazte observe qu'il faut **dix minutes** à un opérateur-stagiaire disposant d'un mois d'expérience pour parvenir à un assemblage simple sur la station SAMMI - voir le schéma de mobilités-. La raison est qu'il faut faire preuve de concentration, de prudence et de dextérité pour éviter d'endommager la station ou une pièce ; cela est moins gênant pour cette dernière. Grâce à l'asservissement visuel qu'il a développé, un assemblage automatique dure **en moyenne 41 s** - entre 34 s et 37,4 s selon le tableau suivant-. Le gain temporel d'un **facteur quinze** est remarquable, mais il ne faut pas se laisser éblouir par cette prouesse et en oublier le gain énorme de fiabilité du fonctionnement qui préserve l'intégrité de la station devenue cellule de production en s'automatisant.



4.14 – Description des mobilités de la station SAMMI

Durée d'une phase de : / N° de l'essai	Prise & dépose du premier microcomposant	Prise & insertion du second microcomposant	Durée totale [s]
Assemblage 1	25.9	13.9	39.8
Assemblage 2	29.7	11.7	41.4
Assemblage 3	22.0	12.0	34.0
Assemblage 4	28.3	11.5	39.8
Assemblage 5	35.7	11.7	47.4
Assemblage 6	31.3	12.0	43.3
Assemblage 7	28.8	11.8	40.6
Assemblage 8	29.4	11.9	41.3
Assemblage 9	27.8	11.9	39.7
Assemblage 10	29.4	11.7	41.1
moyenne	28.8	12.0	40.8

Lors d'une seconde campagne expérimentale [Tam09c], Brahim Tamadazte a relevé les ordres de grandeur en précision et taux de réussite pour une opération de « pick and place » décomposée en six étapes. La première d'entre elles consiste à assurer un alignement angulaire « Ali. Ang. » par l'orientation de la table de travail - objectif d'erreur statique : $0,5^\circ$ -. Pour la seconde étape, le positionnement en centrage « Pos. Cen. » déplace la table en X et Y et centre donc le microcomposant sous la pince. La troisième est celle de la fermeture de la pince « Fer. Pin. » : le déplacement d'un doigt est déterminé puis il est reproduit à l'inverse pour l'autre doigt ; une fois le contact établi, le serrage est obtenu par quelques incréments de déplacement supplémentaires qui, via la raideur des doigts de la pince, exercent une micro-force. L'ascension « Asc. » forme la quatrième étape par pilotage de l'axe Z de la pince. La cinquième est celle du transfert et de la descente « Tra. Des. » grâce aux axes X et Y de la table et du Z de la pince ; il s'agit de venir tangenter la table avec une indispensable vue latérale en retour. La sixième et dernière étape de dépose et lâché « Dép. Lâc. » n'est validée qu'après avoir observé une séparation du microcomposant d'avec les deux doigts de la pince. Le tableau qui suit détaille les précisions et réussites ou échecs pour sept tentatives automatiques.

N° essai	Tâche	Ecart initial à annuler	Précision finale	Résultat	observation
1	Ali. Ang.	14 °	0.09 °	Succès	
	Pos. Cen.	1029 µm	0.43 µm	Succès	
	Fer. Pin.	163 µm	1.72 µm	Succès	
	Asc.	Succès	Succès	Succès	
	Tra. Des.	Succès	Succès	Succès	
	Dép. Lâc.	Succès	Succès	Succès	
2	Ali. Ang.	32 °	0.27 °	Succès	
	Pos. Cen.	1015 µm	4.91 µm	Succès	
	Fer. Pin.	163 µm	1.77 µm	Succès	Dépassement
	Asc.	Succès	Succès	Succès	
	Tra. Des.	Succès	Succès	Succès	
	Dép. Lâc.	Succès	Succès	Succès	
3	Ali. Ang.	21 °	0.27 °	Succès	
	Pos. Cen.	1321.5 µm	0.77 µm	Succès	Occultation
	Fer. Pin.	163 µm	1.44 µm	Succès	
	Asc.	Succès	Succès	Succès	
	Tra. Des.	Succès	Succès	Succès	
	Dép. Lâc.	Succès	Succès	Succès	
4	Ali. Ang.	7.53 °	0.68 °	Succès	
	Pos. Cen.	992.5 µm	6.16 µm	Echec	Ecart important
	Fer. Pin.	Echec	/	/	
	Asc.	/	/	/	
	Tra. Des.	/	/	/	
	Dép. Lâc.	/	/	/	
5	Ali. Ang.	33.8 °	Echec	Echec	Occultation
	Pos. Cen.	1750 µm	/	/	
	Fer. Pin.	163 µm	/	/	
	Asc.	/	/	/	
	Tra. Des.	/	/	/	
	Dép. Lâc.	/	/	/	
6	Ali. Ang.	13 °	0.24 °	Succès	
	Pos. Cen.	560.7 µm	0.86 µm	Succès	
	Fer. Pin.	163 µm	Echec	Echec	Effet électrostatique
	Asc.	/	/	/	
	Tra. Des.	/	/	/	
	Dép. Lâc.	/	/	/	
7	Ali. Ang.	15.5 °	0.52 °	Succès	
	Pos. Cen.	348.2 µm	0.64 µm	Succès	
	Fer. Pin.	163 µm	1.11 µm	Succès	
	Asc.	/	/	Succès	
	Tra. Des.	/	/	Succès	
	Dép. Lâc.	Echec	Echec	Echec	Force capillaire

Conclusion : Seuls trois essais ont abouti sur les sept tentatives. Ainsi, le taux d'échec est de 57 %, mais nous avons la chance de disposer d'informations sur les causes de ces échecs. La décomposition de la phase de « pick and place » et la présence d'indicateurs – les mesures et enregistrements vidéo - sont déterminantes dans l'évolution à donner pour reconfigurer ou réorganiser la cellule. Les raisons des échecs sont soit liées à la qualité du développement de la cellule utilisée – un écart est dû à un asservissement dont la synthèse du correcteur est inadaptée, une occultation est causée par un défaut de planification de la trajectoire -, soit à des aléas du micromonde – les effets électrostatique et de capillarité ne sont pas quantifiés par la cellule -. Par exemple, une reconfiguration consiste à programmer une trajectoire planifiée automatiquement par des champs de potentiel avec une source (la position initiale), des sommets (les doigts de la pince et les bords de l'image pour éviter de sortir du champ de vision, au potentiel répulsif) et un puits (la destination, au potentiel attractif). Quant à la réorganisation, elle consiste par exemple à modifier l'implantation matérielle des micro-actionneurs ou l'environnement, y compris atmosphérique, afin de réduire l'apparition des efforts électrostatiques et capillaires – le travail en immersion aqueuse est une solution possible -. Enfin, n'oublions pas que l'assistance automatisée ou semi-automatisée est à prendre en compte pour la préservation de la cellule en évitant des casses de matériel provoquées par un opérateur trop incompetent.

4.1.3 Troisième base expérimentale

Pour finir, nous disposons d'une intéressante source de savoir-faire et retour d'expériences de micromanipulation à travers les travaux de doctorat de Mélanie Dafflon [Daf08] sur des objets de dimension similaire à ceux utilisés par David Hériban - 50 μm -. Son manuscrit nous apprend avec quelle performance elle est en mesure de réussir une micromanipulation.

Cinq technologies de manipulation ont été essayées et pour chacune d'elles, l'influence de divers paramètres a été chiffrée :

- par pincement en opposition, avec des micropincettes, en fonction :
 - o de l'humidité relative, qui influence les effets de la capillarité aux interfaces sur le préhenseur et sur le substrat ;
 - o de la nature des matériaux, et plus précisément la présence ou non d'une couche hydrophobe sur les doigts du préhenseur, ou d'un dépôt de 10 [nm] de chrome sur le substrat en verre ;
- avec préhension par adhésion et dépose inertielle, en fonction :
 - o de l'humidité relative ;
 - o de la fréquence de(s) l'impulsion(s) de dépose ;
 - o de la quantité d'impulsions sinusoïdales – d'une jusqu'à un train de dix-;
- par capillarité en fonction :
 - o de la condensation, et de l'évaporation ;
 - o de la géométrie - cubique vs sphérique - et des matériaux - silicium vs polystyrène – manipulés ;
- par l'usage de charges électrostatiques, en fonction :
 - o de la tension minimale de prise ;
- par vide « vacuum », pour la prise et dépose inertielle.

4.1.3.1 Synthèse des taux de réussite et des statistiques expérimentales

Le huitième chapitre de la thèse de Mélanie Dafflon [Daf08] intitulé « opérations de micromanipulation » laisse apparaître d'intéressants ordres de grandeurs que nous allons sélectionner et recenser dans les tableaux suivants⁷.

⁷ Numérotation identique au manuscrit d'origine pour faciliter un approfondissement au lecteur souhaitant s'y référer en détail.

Nous disposons, tout d'abord, des performances de positionnement, à différents taux d'humidité relative, lors de manipulations effectuées avec une pince pneumatique et des embouts en silicium de 12 μm d'épaisseur :

- tableau 8.2 -

SUBSTRAT	HUMIDITÉ RELATIVE	RÉPÉTABILITÉ		TAUX DE RÉUSSITE [%]
		x [μm]	y [μm]	
Verre	3% $\pm$ 1%	7.98	8.94	76%
	21% $\pm$ 1%	5.08	8.18	89%
	44% $\pm$ 3%	3.44	4.76	91%
Verre + coating hydrophobe	3% $\pm$ 1%	11.9	2.62	95%
	21% $\pm$ 1%	6.14	2.34	89%
	44% $\pm$ 3%	13.88	3.14	93%

Conclusion : Le revêtement hydrophobe est utile principalement lorsque l'atmosphère de l'environnement de travail est sèche - de 3 % - ; il accroît alors de 19 points le taux de réussite d'une dépose. En revanche - et c'est le revers de la médaille -, la distribution en positionnement s'en trouve dégradée avec d'importants écarts, significatifs, entre X et Y.

Le tableau suivant nous indique les résultats de positionnement de billes de polystyrène de $\varnothing$ 50 μm à l'aide d'une pince MEMS en présence ou non d'un dépôt hydrophobe sur les embouts :

- tableau 8.3 -

SUBSTRAT	REVETEMENT HYDROPHOBE AU PRÉHENSEUR	RÉPÉTABILITÉ		TAUX DE RÉUSSITE
		x [μm]	y [μm]	
Verre	Non	1.34	1.48	86%
	Oui	1.68	1.84	93%
Verre + 10nm chrome	Non	1.32	2.20	71%
	Oui	1.40	1.76	89%

Conclusion : Non seulement nous apprenons que le dépôt hydrophobe améliore significativement la dépose de +7 points et +18 points, mais il apparaît, de surcroît, que le dépôt de 10 nm de Chrome dégrade la dépose, en comparaison à un substrat de verre seul, sans affecter significativement la répétabilité.

La synthèse relative aux performances de positionnement obtenues lors de la dépose de billes de polystyrène de $\varnothing 50 \mu\text{m}$ à l'aide d'une micropince pneumatique munie d'embouts en acier inoxydable avec une couche hydrophobe, est la suivante :

- tableau 8.4 -

SUBSTRAT	RÉPÉTABILITÉ		TAUX DE RÉUSSITE
	x [μm]	y [μm]	
Verre	12.36	6.08	71%
Verre + 10nm chrome	2.92	3.42	59%

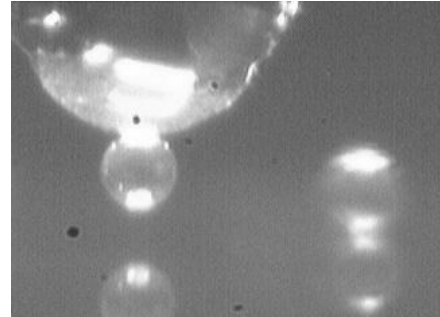
Conclusion : La technologie pneumatique est moins efficace que la technologie MEMS (-22 et -30 points), et la meilleure réussite sans la couche de chrome se confirme. En revanche, le revêtement de Chrome améliore de 24 à 56 % la qualité de la dépose avec une meilleure répétabilité.

La série d'expériences suivantes traite des cas de saisie par inertie. Ici, contrairement à la stratégie précédente de prise par pincement issue du mésomonde et identique à la technique de David Hériban, il s'agit de prélever le microcomposant par adhésion surfacique puis de le déposer par inertie – en le secouant -, à la manière dont on saisit une miette de pain en humidifiant le bout de son doigt et dont on s'en débarrasse en le secouant rapidement. Le taux de réussite traduit la prise «touch and go» obtenue, au premier essai, par adhésion contre une surface sphérique en verre d'une bille de polystyrène de $\varnothing 50 \mu\text{m}$ posée sur un substrat lui-même en verre recouvert d'une couche hydrophobe. Les conditions de l'environnement ambiant de manipulation durant les expérimentations sont précisées puisque c'est principalement la capillarité qui intervient :

- tableaux 8.5 & 8.6 -

INTITULÉ	HUMIDITÉ RELATIVE	TEMPÉRATURE	Taux de réussite
2%	2.3% $\pm$ 1.0%	24.9°C $\pm$ 0.2°C	54%
20%	20.9% $\pm$ 1.0%	25.0°C $\pm$ 0.6°C	71%
40%	42.9% $\pm$ 1.9%	23.7°C $\pm$ 1.2°C	83%

Conclusion : L'auteur nous fait remarquer que « *Finalement, divers effets aléatoires sont apparus comme les sauts inopinés des billes ou leur retour vers une position toujours identique lors de prises ratées par exemple. Ces effets semblent dûs à la présence de charges électrostatiques. Ils apparaissent parfois dès les premières opérations sur une bille, mais interviennent souvent aussi après une série de manipulations. Ces effets électrostatiques sont aussi nettement plus importants à faible humidité relative* ». L'humidité relative ambiante est déterminante puisqu'elle apporte jusqu'à 29 points de taux de réussite supplémentaire réduisant l'influence des charges électrostatiques perturbatrices.



4.15 – Vue du préhenseur sphérique et la micro-bille - et deux reflets -

Après la saisie vient l'étape de dépose par inertie. Il s'agit alors de relever la fréquence minimale – seuils - d'excitation de l'actionneur piézoélectrique qui induit cette dépose en mode single - une unique impulsion sinusoïdale - :

- tableau 8.7 -

HUMIDITÉ RELATIVE	MOYENNE [KHZ]	ECART-TYPE [KHZ]	MIN [KHZ]	MAX [KHZ]	TAUX DE RÉUSSITE
2%	213.16	44.12	150	310	87%
20%	239.6	43.54	160	330	81%
40%	253.33	55.75	140	400	88%

Conclusion : La fréquence est d'autant plus élevée que l'atmosphère est humide. La réussite de la dépose n'est pas assurée.

Une opération similaire de dépose par inertie en mode multiple –un train de dix impulsions sinusoïdales- permet la mesure des seuils de fréquence minimum :

- tableau 8.8 -

HUMIDITÉ RELATIVE	MOYENNE [KHZ]	ECART-TYPE [KHZ]	MIN [KHZ]	MAX [KHZ]	TAUX DE RÉUSSITE
2%	252.73	52.93	160	380	100%
20%	227.92	40.96	150	340	96%
40%	243.29	65.35	130	490	100%

Conclusion : Le mode multiple est plus efficace car la dépose est quasiment garantie. Mais il subsiste une grande dispersion des fréquences dues à des conditions d'interfaces non reproductibles, ni stables.

Dès lors, il est possible de recenser la force d'inertie équivalente nécessaire à la dépose et calculée à partir des mesures de la fréquence minimale.

- tableau 8.9 -

HUMIDITÉ RELATIVE	MODE D'EXCITATION	FORCE ÉQUIVALENTE [μN]		
		MOY.	MIN	MAX
2%	Single	7.6	3.5	15.0
	Multiple	10.3	4.0	22.3
20%	Single	9.2	4.0	16.8
	Multiple	8.3	3.5	17.9
40%	Single	10.4	3.0	24.7
	Multiple	9.8	2.6	37.1

Conclusion : La valeur minimale confirme la présence d'un ménisque à l'interface. Cependant, l'effort est étonnamment supérieur en mode multiple à 2 % d'humidité seulement – et non pas à 20% ou 40 % comme on pourrait s'y attendre -. Cette incohérence peut se justifier par la qualité des surfaces intervenantes.

Il s'agit maintenant d'évaluer les performances de positionnement à la fréquence minimale induisant la dépose :

- tableau 8.10 -

HUMIDITÉ RELATIVE	MODE D'EXCITATION	RÉPÉTABILITÉ		TAUX DE RÉUSSITE [%]	
		x [μm]	y [μm]	Dépose	Erreur < 20μm
2%	Single	8.82	6.84	87%	84%
	Multiple	3.76	4.02	100%	91%
20%	Single	11.04	1.98	81%	77%
	Multiple	6.92	4.86	96%	92%
40%	Single	7.36	3.14	88%	81%
	Multiple	7.86	5.18	100%	92%

Conclusion : La meilleure précision de la dépose apparaît nettement avec un train d'impulsions (+ 7, +15 et +11 points selon l'humidité relative).

Ces mêmes performances de positionnement sont quantifiées pour un seuil de 350 kHz ce qui éviterait, dans une automatisation, d'avoir à piloter la fréquence en fonction d'une mesure de l'humidité. Notons que cette fréquence est inférieure aux fréquences maximales observées précédemment pour assurer la dépose, notamment lors d'une forte humidité relative :

- tableau 8.11 -

HUMIDITÉ RELATIVE	MODE D'EXCITATION	RÉPÉTABILITÉ		TAUX DE RÉUSSITE [%]	
		x [μm]	y [μm]	Dépose	Erreur < 20 μm
2%	Single	7.82	3.74	59%	48%
	Multiple	5.62	1.80	97%	97%
20%	Single	9.50	1.88	73%	70%
	Multiple	11.84	4.38	100%	93%
40%	Single	8.74	5.26	92%	89%
	Multiple	7.78	4.94	100%	90%

Conclusion : Les performances sont meilleures en mode multiple, car comme l'auteur le souligne à juste titre :

« L'utilisation d'un seuil élevé, qui induit une force d'inertie plus grande que nécessaire, n'améliore ni le taux de réussite de la dépose, ni par ailleurs le positionnement. Il vaut donc mieux un signal minimal et répétitif qu'une impulsion à haute fréquence. Il apparaît aussi que la répétabilité du positionnement est meilleure à basse humidité relative. Ceci pourrait s'expliquer par une perturbation due à la présence d'un ménisque à plus haute humidité relative dont la rupture serait moins homogène qu'en cas de contact sec. »

Cette remarque sur les fréquences critiques nous replonge dans la description d'une IHM qui doit être en mesure de déceler, par exemple dans un souci d'ergonomie, la vivacité d'un appui de l'opérateur sur une touche, à l'image de l'attaque du pianiste à laquelle nous avons déjà fait allusion.

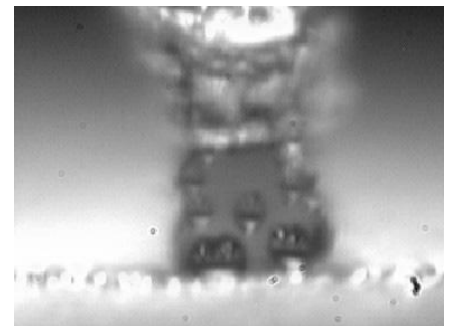
Avant de pousser un peu plus loin l'analyse des expérimentations, remarquons que de nombreuses informations utiles à la micromanipulation viennent d'être mentionnées mais d'autres paramètres déterminants dans la reproductibilité de ces expériences n'ont pas été recensés. Il est naturel de penser que l'orientation selon laquelle s'effectue cette dépose est très influente – ici, l'auteur précise que cela s'est fait à la perpendiculaire du substrat, mais était-il horizontal ? -. Et quelle est

l'influence de la température ? Et quelle température ? Ambiante, celle du préhenseur, celle du substrat, celle de la bille ? Autant de valeurs qui enrichiront ad vitam les bases de données du système d'information.

Une autre stratégie de prise et dépose consiste à utiliser les efforts de capillarité en agissant sur un cycle de température du préhenseur pour condenser et/ou évaporer le ménisque. Les variations de température ne sont imposées que par un effet Peltier au niveau du préhenseur. Pour agir sur le substrat, il est choisi d'utiliser la conduction dans le microcomposant :

- tableau 8.12 -

MICROCOMPOSANT	OPÉRATION	RÉPÉTABILITÉ		TAUX DE RÉUSSITE [%]
		x [μm]	y [μm]	
Cubes 50μm silicium	Prise	3.40	2.46	97%
	Dépose	4.00	6.36	83%
Billes Ø50μm polystyrène	Prise	8.08	8.92	75%
	Dépose	9.80	6.80	79%



4.16 – Vue de microgouttes condensées sur un cube de silicium

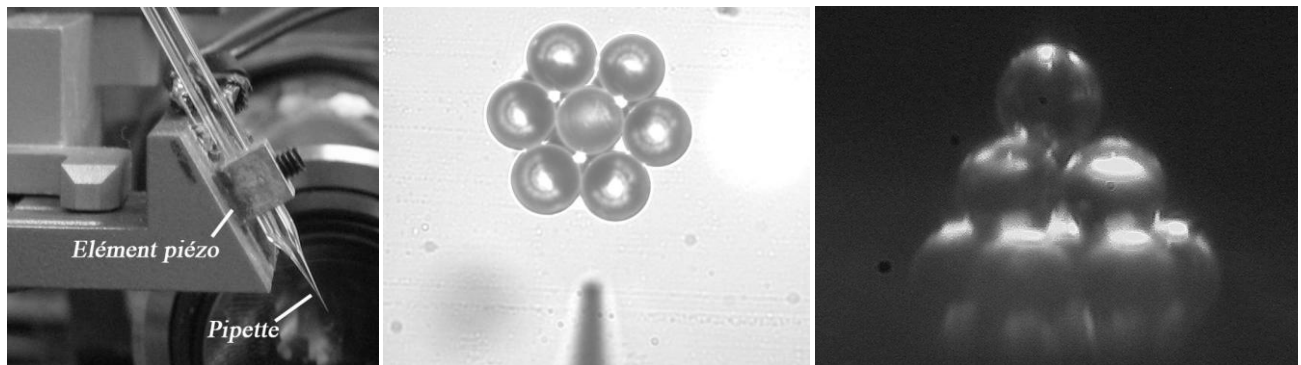
Conclusion : La forme et/ou le matériau du microcomposant influence grandement l'opération lors de la prise (+ 14 points) et sensiblement à la dépose (+ 4 points). Cependant, l'aspect temporel n'est pas quantifié et la cinétique thermique est relativement lente bien qu'accélérée au regard du mésomonde par les faibles dimensions, donc les faibles volumes et la faible quantité de chaleur à gérer.

Le dernier cas présenté est celui d'une préhension par vide d'air - vacuum - d'une bille de Ø 50 μm en polystyrène avec une pipette de Ø 13 μm, avec ou sans vibration - à 2 kHz en signal carré -. Le critère observé est celui de la répétabilité de positionnement sur un substrat en verre :

- tableau 8.13-

TYPE DE DÉPOSE	RÉPÉTABILITÉ DE POSITIONNEMENT			
	PRISE		DEPOSE	
	x [μm]	y [μm]	x [μm]	y [μm]
Avec vibration	2.83	5.81	1.56	3.19
Sans vibration	2.18	3.77	3.29	16.41

Conclusion : Les billes sont en général attirées sur des distances allant jusqu'à 12 μm et la vibration de l'actionneur piézoélectrique n'affecte pas la capacité de prise. Le contact avec le composant n'est même pas nécessaire dans 78 % des cas, où la saisie se produit à une distance [orifice-composant] variant de 1 à 3 μm - valeur pour une humidité relative de 42 % $\pm$ 3 % -. La présence de la vibration améliore grandement la répétabilité de la dépose avec 79 % de précision supplémentaire.



4.17 – Vue surprenante de l'opération d'assemblage pyramidal de 11 billes de $\varnothing$ 50 μm en polystyrène et vue de la technologie de pipette utilisée

4.2 Simulation et validation de modèles de SI

Au vu de ce qui vient d'être développé, les simulations s'appuient sur un savoir-faire expérimental qui nous permet d'initialiser les paramètres déterminants dans l'évolution de la simulation du système micro-usine. Techniquement, l'objectif est double, à l'image des expérimentations qui ont guidé la progression actuelle de la micro-usine. Il s'agit d'observer les résultats, d'une part, des réussites expérimentales qui contribuent - comme les échecs mais pour une moindre mesure - à l'accroissement de la connaissance, et d'autre part, de la temporalité qui contribuera à l'expansion du concept de micro-usine et à sa démocratisation.

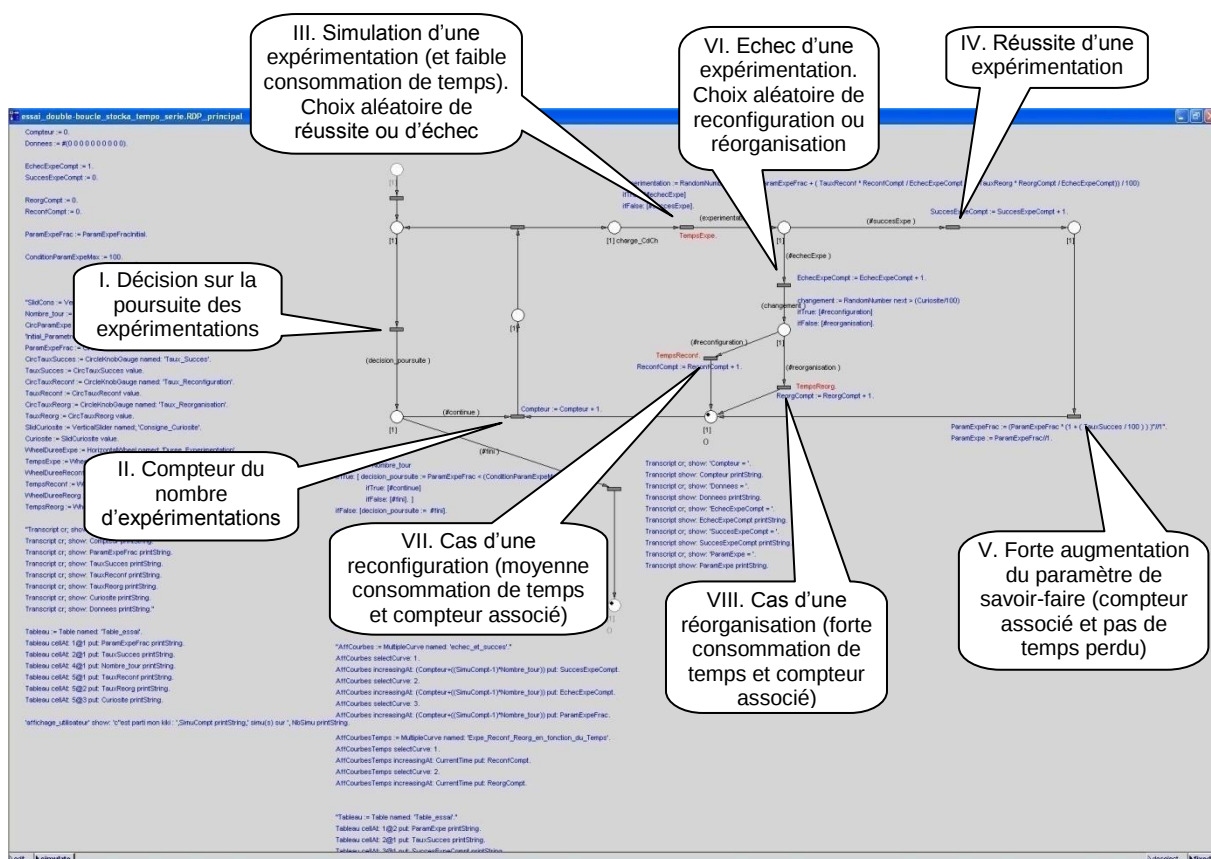
Afin d'estimer la qualification de la micro-usine, nous avons opté pour un plafonnement relatif des connaissances à travers un taux exprimé en pourcentage. La saturation à 100 % de ce paramètre est arbitraire puisque nous considérons que, dans le cas réel, de nouvelles propriétés du micromonde auront une influence sur le comportement des micro-objets. Cette immensité du domaine micrométrique est bien amenée à évoluer ad-vitam puisque nous ne pouvons garantir un inventaire exhaustif des paramètres. La géométrie et les dimensions, les matériaux - densité, rigidité, homogénéité, porosité -, les dépôts surfaciques - l'état de surface ; sa morphologie parfois hydrophobe -, ou encore la conductivité électrique sont autant de paramètres à fort impact sur le micromonde. Plus tard, nous pourrions être amené à observer que les couleurs, l'indice optique de réfraction, la porosité et, qu'en savons-nous dans l'immédiat, peut-être même l'âge d'une cellule biologique manipulée et/ou son histoire, ont une influence déterminante sous certaines conditions.

La définition des connaissances que nous venons de citer - l'infini est donc ici considéré à 100 %, au plafond -, nous amène abusivement, mais consciemment, à une première hypothèse qui nous permet de relancer la simulation afin d'observer sa répétabilité et l'évolution moyenne probable du système. Nous verrons qu'à quelques exceptions près, les simulations successives sont assez répétables.

4.2.1 Description du simulateur d'évolution d'une micro-usine

4.2.1.1 Le réseau de Petri au cœur du simulateur

Tel que proposé dans la littérature [LamS03] pour la simulation de systèmes industriels reconfigurables, nous avons procédé, à partir d'un réseau de Petri [Pet73], à la construction d'un modèle représentant l'évolution d'une micro-usine⁸. Ce réseau principal est stochastique et temporisé pour, premièrement, inclure les aléas du micromonde et, deuxièmement, observer l'impact des temps importants de reconfiguration et surtout de réorganisation sur l'aboutissement d'une mise en production efficace. Soulignons cependant que ces deux aspects, chronologie et indéterminisme, sont indépendants ; une évolution possible de ce modèle consiste à inclure une gestion des choix de scénarii en fonction de l'historique, voire d'une échéance à tenir.



4.18 - Le RdP aléatoire - stochastique - et T-temporisé simulé avec PACE

⁸ La figure 4.22 propose une vue globale, commentée, de l'ensemble du réseau de Pétri utilisé.

En présence d'une nouvelle fabrication, il faut estimer le taux de connaissance initial et le saisir sur le pupitre du simulateur à partir du bouton rotatif « paramètre initial d'expérimentation » - figure 4.20, n° 2, bleu en haut à gauche -. Sa valeur dépend de l'expérience acquise antérieurement, pour un micro-produit a priori similaire, par la micro-usine et l'opérateur.

Ensuite, la simulation essaye de progresser, tant que le cadran - n° 11, rouge en haut à droite du pupitre - « paramètre d'expérimentation », relatif au taux de connaissance, n'atteint pas la valeur 100 % ou que l'on n'a pas épuisé un nombre d'essais maximal fixé initialement par le « nb de tours maxi » - curseur n° 3 vertical bleu situé en haut à droite du pupitre -. En pratique, par exemple, cette condition de sortie s'appuie sur une quantité maximale de microcomposants disponibles avec un wafer au-delà de laquelle l'expérimentation s'arrêtera quoiqu'il en soit. L'afficheur vertical - n° 9, jaune et rouge situé en haut à droite du pupitre - permet d'observer sur chaque production si l'on flirte ou non avec cette limite physique avant d'atteindre le taux final de connaissance expérimentale.

Dès lors qu'une expérimentation est essayée, afin d'assurer une interprétation des résultats, nous avons limité à deux familles de tirages aléatoires la suite des événements :

- le premier et principal tirage décide de la réussite ou de l'échec de l'expérimentation - transition de la bulle n° 3 ; le résultat du tirage aléatoire est comparé à la connaissance ; s'il est supérieur alors c'est un échec, si c'est la connaissance qui est supérieure alors l'expérience est une réussite - ;
- en cas d'échec, un second tirage permet de procéder soit à une reconfiguration, soit à une réorganisation - transition de la bulle n° 6 ; le tirage aléatoire est comparé à une consigne de curiosité -.

Les conséquences de réorganisation ou reconfiguration sont plus ou moins avantageuses ou pénalisantes sur les critères d'occurrence d'une réussite à venir et sur l'impact temporel. Ces derniers se résument assez bien avec le tableau suivant, et seront approfondis lorsque nous traiterons les cas de simulations :

Décision suite à un échec	Probabilité d'une réussite à venir	Impact temporel
Reconfiguration	Moins probable	Faiblement pénalisant
Réorganisation	Plus probable	Fortement pénalisant

Le tirage relatif à cette décision est rapporté à un paramètre appelé « consigne_curiosité » qui, selon sa position, oriente la décision à prendre en cas d'échec - curseur vertical n° 7 vert situé en haut à gauche du pupitre -. Le réglage de ce curseur traduit l'engagement prospectif de la micro-usine pour la production en cours. Les initiatives et une certaine prise de risque en prospection sont susceptibles de provoquer de grandes avancées avec de nouveaux champs de connaissance, mais aussi de provoquer de lourdes pertes notamment de temps en cas d'échec total.

A la fin d'une expérience, la connaissance progresse inéluctablement. Nous disposons de trois taux de progression pour initialiser la simulation ; ils sont accessibles par les curseurs n° 4, 5 et 6 - détaillés ci-après -. Nous prendrons soin de les régler de sorte que le taux suite à une réussite soit supérieur à celui d'une réorganisation, et lui-même supérieur à celui d'une reconfiguration.

Soulignons un cas concret d'intervention d'un phénomène aléatoire pouvant apparaître lors de l'assemblage de la microvache. Après avoir placé le corps sur le gel pack orienté sur l'arrête dorsale de l'animal, il s'agit d'insérer les deux paires de pattes postérieures puis antérieures, ou antérieures puis postérieures. Alors que l'ordre de ces insertions semble sans influence pour un opérateur, il s'avère que face à un scénario d'assemblage peu robuste, la réussite peut évoluer d'un assemblage à l'autre.

En effet, les efforts surfaciques, induits à distance - donc inattendus par un opérateur novice - par les charges électrostatiques arrachées par l'insertion et qui s'accrochent sur les pattes et sur le corps, n'ont pas le même effet du côté postérieur et du côté antérieur puisque la géométrie de la queue, assez fine mais proche de la fente postérieure, est différente de celle du profil de la tête plus grosse mais aussi plus éloignée de la fente antérieure d'insertion. Ces charges électrostatiques ne sont pas très répétables puisqu'elles dépendent fortement des positions et orientations relatives, ainsi que du jeu fonctionnel réel ; et tous ces paramètres changent d'un assemblage à l'autre. Ainsi, la réussite de l'insertion de la première paire de pattes est différente selon que l'on insère d'abord les pattes antérieures ou les pattes postérieures.

Ensuite, lorsque la seconde paire de pattes est insérée, elle est influencée par la paire déjà en place qui accumule à son tour des charges électrostatiques. Ainsi,

dans l'ordre d'assemblage, nous observons qu'une même opération n'aura pas le même taux de réussite selon qu'elle intervient avant ou après une autre opération qui influence désormais son environnement proche.

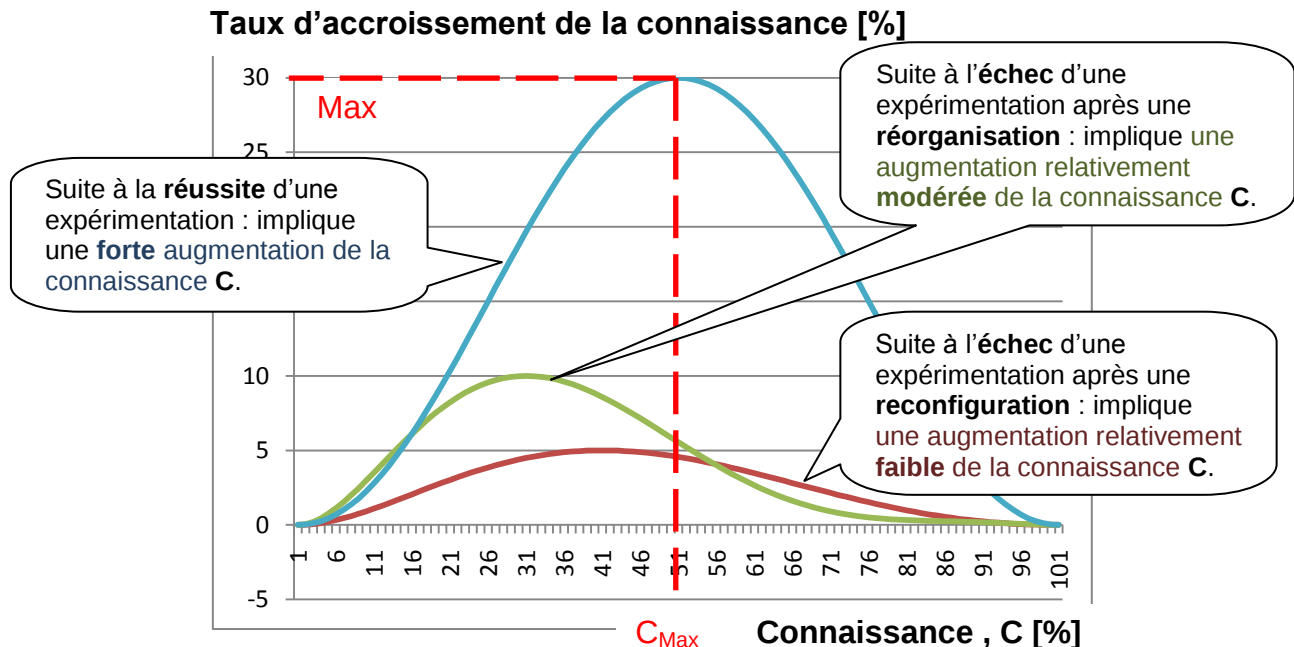
Par conséquent, lors du principal tirage, pour décider de la réussite ou de l'échec par le simulateur, seul intervient le paramètre « connaissance expérimentale » car plus on a de connaissances, moins on risque l'échec.

Dans le code du simulateur de réseau de Petri, ce paramètre est appelé ParamExpe puisqu'il évolue à chaque expérience et dépend bien des résultats des expériences antérieures. De ce fait, la connaissance va croître à chaque expérience plus ou moins selon qu'elle aboutit à un succès ou à un échec successif à une reconfiguration ou une réorganisation. Afin de respecter l'idée d'une connaissance absolue quasi-inatteignable, nous calquons le modèle d'évolution de la connaissance sur un profil en sigmoïde. Trois périodes se distinguent : la première avec une lente progression de la connaissance lorsque l'on initie un nouveau procédé, une seconde avec une rapide progression lorsque l'on commence à maîtriser le contexte, et une troisième avec une progression décroissante permettant une lente convergence vers la connaissance totale.

Nous avons opté pour une modélisation de l'évolution des taux de progression de la connaissance par une loi en cloche, sorte de Gaussienne que nous approximations par un polynôme, d'ordre six pour satisfaire des conditions aux limites. Ce choix polynomial, plutôt qu'avec des exponentielles, s'est imposé par l'absence d'une telle fonction dans la librairie de smalltalk. La loi est paramétrée par son maximum, l'abscisse de ce maximum et l'aire située sous la loi afin de la gonfler plus ou moins selon de « l'envergure » de opérateur – détermination des coefficients fournie en annexe (§ 6.3) -. Cette envergure dépend de la personnalité de l'opérateur et sa capacité à produire de nouveaux et efficaces scénarii à expérimenter avec reconfiguration ou réorganisation. La qualité du système d'organisation de la micro-usine et sa gestion de la connaissance impactent également cette envergure. Nous utilisons ainsi la loi pour définir les trois taux de progression, s'appuyant chacun sur trois triplets de boutons rotatifs - n° 4, 5, 6 -, destinés aux cas de réussite expérimentale, de reconfiguration et de réorganisation.

Rappelons que pour un fonctionnement réaliste de la simulation, il convient de régler ces lois polynomiales de sorte que le taux de succès soit supérieur à celui d'une réorganisation, lui-même supérieur à celui d'une reconfiguration.

La figure représente un exemple de lois d'évolution obtenues avec cet outil. La loi intermédiaire de réorganisation - en vert - intervient plus tôt que celle inférieure de reconfiguration justifiant l'intérêt d'une large prospection avec des réorganisations au début d'une campagne d'essais.



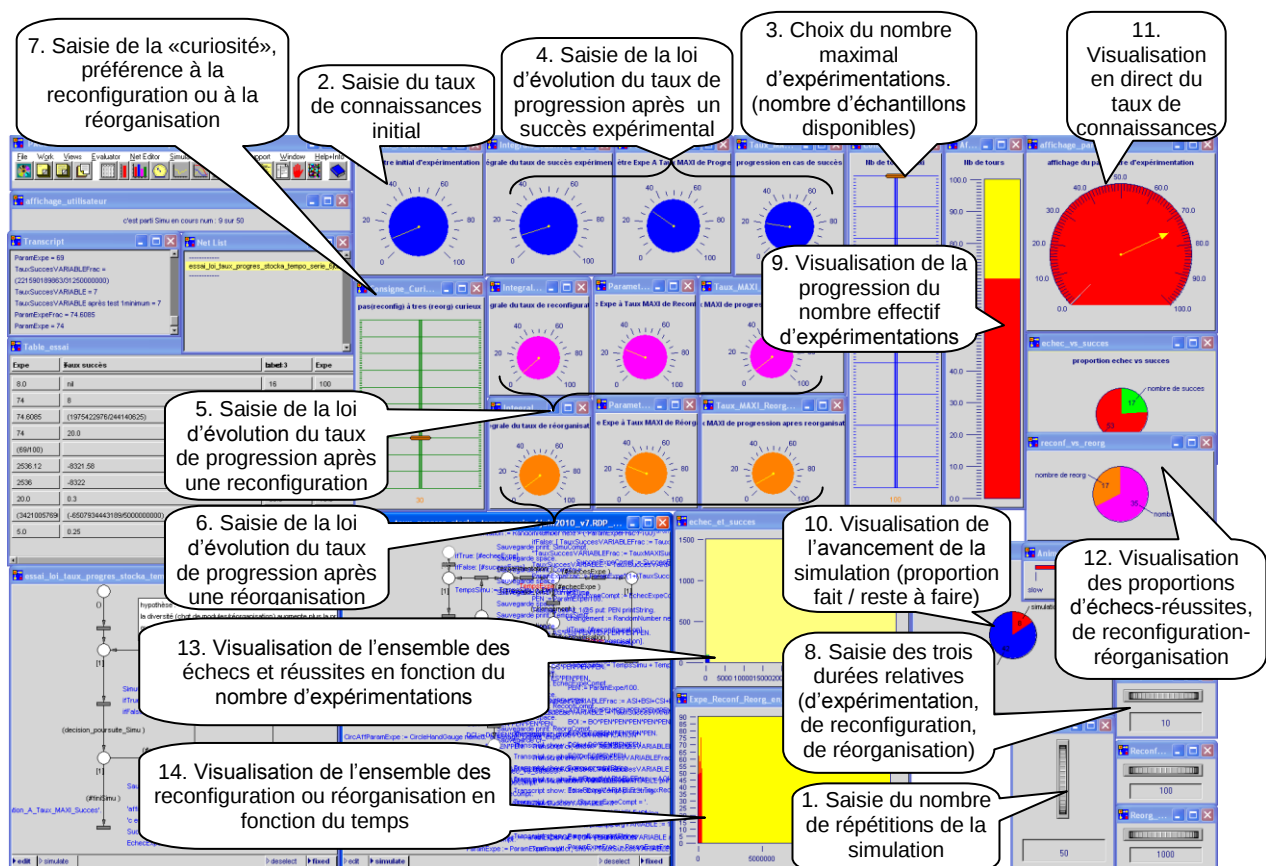
4.19 – Exemple type de lois polynômiales pour les taux de progression du ParamExpe

Concernant l'aspect temporel, trois paramètres sont associés à chacun des trois cas de figure : l'expérimentation - incluant la réussite - et, en cas d'échec, la reconfiguration et la réorganisation.

Ces paramètres sont accessibles pour l'initialisation de la simulation, en fonction des délais moyens connus pour les cas en question, grâce à trois curseurs horizontaux situés en bas à droite du pupitre, n° 8. Ils définissent l'incrément temporel à chaque franchissement de la transition à laquelle ils sont associés.

4.2.1.2 La partie émergée du simulateur

La figure suivante permet d'appréhender le pupitre à renseigner par utilisateur du simulateur ainsi que les grandeurs visibles en cours de simulation. Les numéros un à huit configurent le simulateur, les numéros neuf à quatorze restituent le résultat de la simulation.

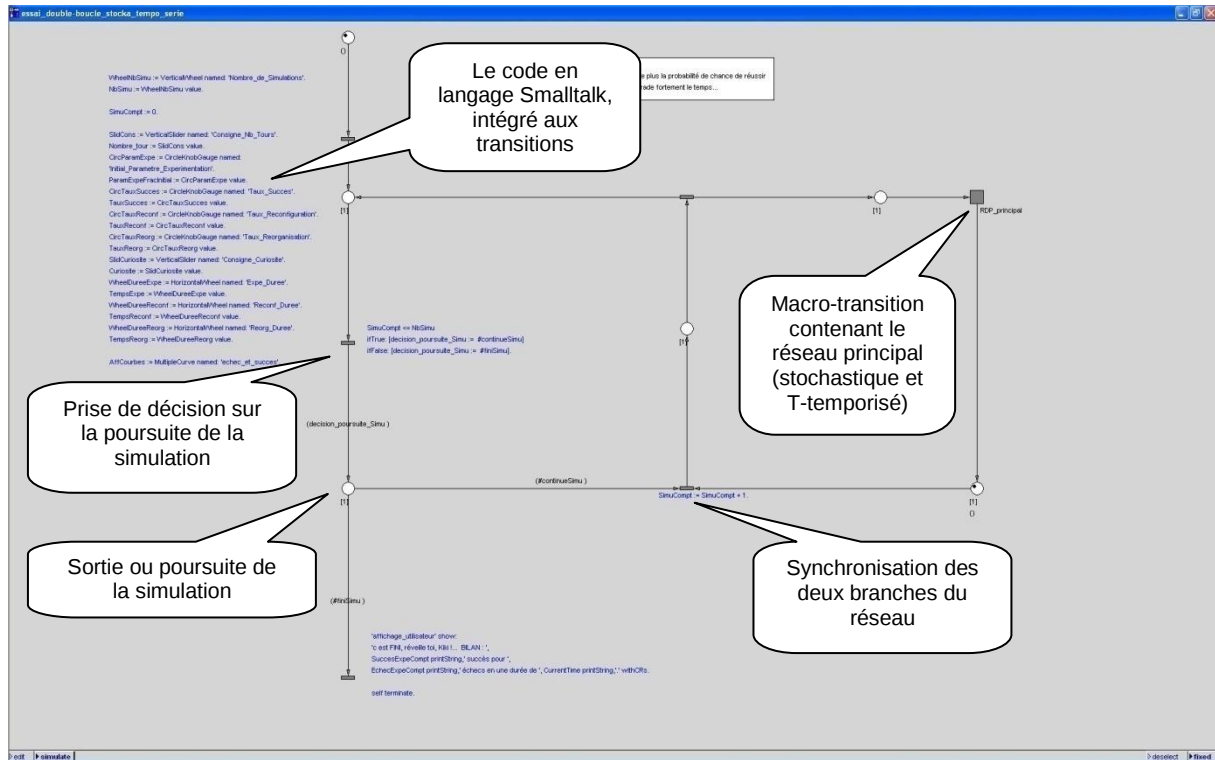


4.20 - Vue du pupitre de simulation avec PACE

4.2.1.3 Une analyse statistique de la répétabilité

Il est nécessaire d'éviter toute généralisation abusive des résultats obtenus. Pour cela, la simulation est relancée plusieurs fois, ce qui autorise une détermination de la répétabilité afin de ne retenir que les évolutions moyennes du système. Ainsi, notre « réseau principal » est inclus dans un réseau hiérarchiquement supérieur qui l'exécute en boucle selon un réglage accessible sur le tableau de bord du simulateur sous l'appellation « Nombre_de_Simulations » - curseur n° 1 situé en bas à droite du pupitre -. Visuellement, le résultat de chaque simulation se remarque dans chaque période des deux chronogrammes - n° 13 et 14 sur fond jaune - en bas à droite du

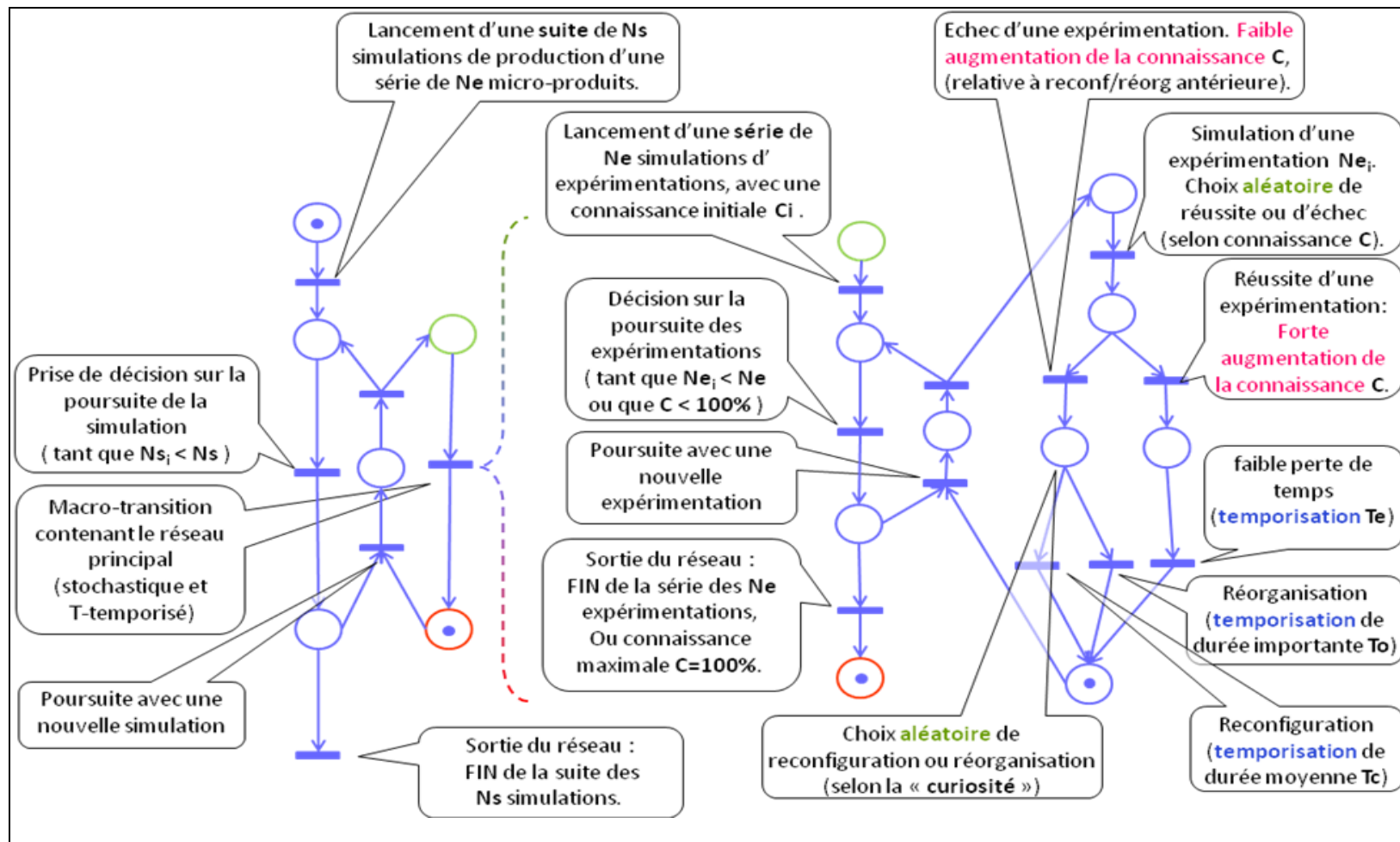
pupitre. Par ailleurs, techniquement, lors du franchissement de la première transition ce premier réseau initialise les paramètres d'entrée par la lecture des diverses valeurs choisies et configurées via le pupitre.



4.21 - Le réseau d'exécution en boucle de la simulation aléatoire pour permettre une analyse statistique

L'ensemble des données - initiales et résultats - est sauvegardé pour permettre une analyse avec Matlab qui empile les valeurs numériques dans des tableaux tridimensionnels et permet notamment leurs tri et affichage en trois dimensions. Ce traitement des résultats de simulation est également utilisé pour une analyse statistique.

La figure 4.22 présente une synthèse du réseau de Petri utilisé. Elle permet une vision globale du simulateur incluant les paramètres qui conditionnent les franchissements des transitions.



4.22 – Le réseau de Petri global et détails de sa composition

4.2.2 Exploitation des résultats de simulation

Le programme du simulateur par réseau de Petri stochastique T-temporisé, développé sous PACE, comporte des observateurs - e. g. compteurs - dans le code des transitions. Ces derniers permettent, en cours de simulation, une prise de connaissance de chaque paramètre.

Ces informations sont enregistrées et permettent, d'une part, l'analyse post-simulation de l'influence des multiples paramètres d'entrée sur les grandeurs de sortie, voire la présence de corrélations. D'autre part, l'enregistrement peut autoriser de calculer pour chaque grandeur les statistiques de la simulation. Nous utiliserons ces enregistrements pour en apporter un affichage graphique lisible avec des tris selon différents aspects.

4.2.3 Les résultats de simulation

Nous allons maintenant présenter trois cas d'études - notés A, B et C - d'une prise en main d'une micro-usine par un opérateur novice – n'ayant que 10 % des connaissances nécessaires - et qui se différencient par leurs conditions initiales regroupées dans le tableau page suivante. En voici une description :

- le cas A se rapproche des micromanipulations et micro-assemblages réalisés en télé-opération par Mélanie Dafflon et David Hériban avec des microcomposants de quelques dizaines de μm :
 - o les temps de manipulation sont de l'ordre de la dizaine de minutes, une reconfiguration nécessite environ deux jours et une réorganisation un mois – respectivement 1, 100, 1000 minute(s) - ;
 - o la progression de la connaissance est régulière en cas de réussite expérimentale, ainsi que lors des reconfigurations, mais elle est plus importante en début de campagne pour les réorganisations - notamment faute d'opérations automatiques ou d'assistance logicielle sophistiquée - ;
 - o l'opérateur est assez peu curieux - préférant de deux tiers une réorganisation à une reconfiguration -.

Les cas B et C sont de l'ordre des développements menés par Brahim Tamadazte, avec des microcomposants de quelques centaines de μm , mais ils diffèrent principalement l'un de l'autre par la stratégie de curiosité qui est simulée :

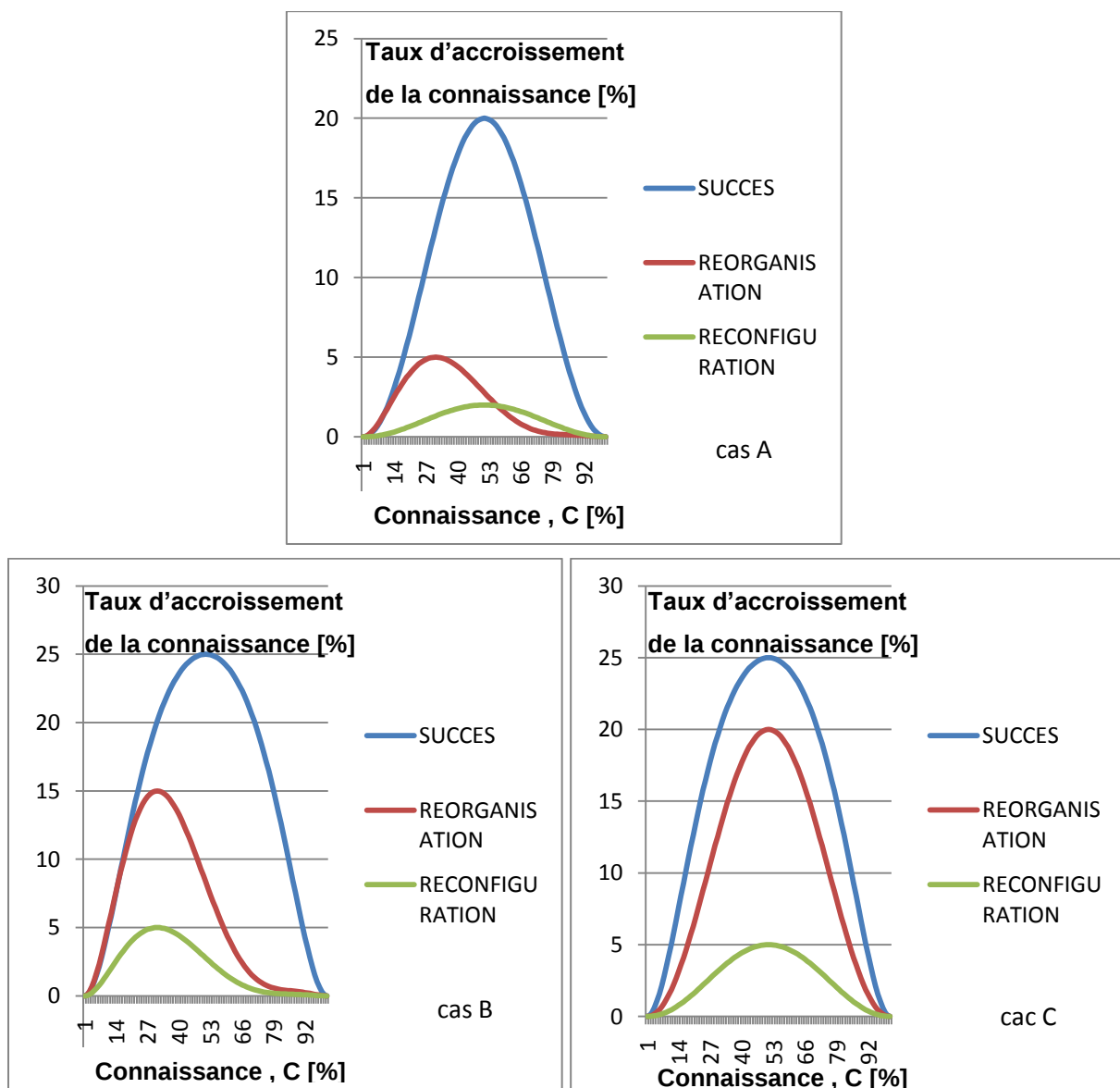
- le cas B est le plus curieux avec 50 % de réorganisation en cas d'échec, donc sa démarche est a priori chronophage, et sa connaissance progresse rapidement en début d'investigation tout en étant assez efficace ;
- le cas C vise un gain temporel avec une plus faible curiosité de 10 % seulement, mais quasiment aussi efficace qu'un succès. Le maximum de progression de la connaissance est centré à mi-parcours ;
- dans les deux cas, les durées sont de l'ordre de 1, 100, 20 000 minute(s), soit une minute pour une expérience, une heure-trente pour une reconfiguration et deux mois pour une réorganisation.

Pour ces trois cas, le nombre de micro-produits disponibles - appelé « nb_tour » dans le réseau -, correspondant à la limite physique fixée par la taille d'un wafer, est choisi à cent. Les raisons pour lesquelles nous partons d'une même hypothèse, avec

un opérateur novice n'ayant que 10 % de connaissances, mais 10 % tout-de-même, s'expliquent par le fait que :

- cela permet à la simulation de progresser : un initié avec plus de connaissances accélérerait la fin de la simulation ; avec moins de 10 %, il se produit un long et lent décollage de la connaissance, sorte de « marais » finalement réaliste si l'on confie une micro-usine à un vrai débutant ;
- afin de comparer valablement les diverses simulations, il s'agit de fixer des paramètres ; ceux-ci et la quantité de microcomposants sont donc constants.

Procédons également à une centaine de simulations pour chaque cas afin de visualiser la répétabilité des résultats et leur distribution statistique.



4.23 – Visualisation des taux de progression de la connaissance pour les cas A, B et C lors de succès, reconfiguration et réorganisation

Paramètres	description	A	Observations A	B	Observations B	C	Observations C
Nombre_de_simulations	répétabilité de la simulation	100		100		100	
Nombre_de_tours_maximum	nb d'échantillons de microcomposants disponibles pour fiabiliser le procédé de production	100		100		100	
Expe_Duree	Durée de l'expérimentation	1	min	1	min	1	min
Reconf_Duree	Durée relative d'une reconfiguration	100	1h30 env	100	1h30 env	100	1h30 env
Reorg_Duree	Durée relative d'une réorganisation	1000	2 jours de travail = relativement rapide	20000	2 mois de travail = chronophage	20000	2 mois de travail = chronophage
Consigne_Curiosite	Ratio réorg/reconf à tirage aléatoire en cas d'Echec : faible=peu curieux=beaucoup de reconfiguration, élevé=très curieux=beaucoup de réorganisation	30	peu curieux	50	curieux	10	pas curieux
Initial_ParamExpe	Valeur initiale du paramètre de connaissance	10	novice	10	novice	10	novice
Integrale_Taux_Succes	Intégrale du taux de progression de la connaissance en cas de succès (envergure)	10		15		15	
ParamExpe_a_Taux_Maxi_Succes	Valeur de la connaissance pour le taux de progression maximal en cas de succès	50	centré	50	centré	50	centré
Taux_Maxi_Succes	Progression maximale de la connaissance en cas de succès	20	difficile = Maghi double encoches 40x40x5 [μm^3] (Hériban, Dafflon)	25	raisonnable = double encoches 400x400x100 [μm^3] (Tamadazte)	25	raisonnable = double encoches 400x400x100 [μm^3] (Tamadazte)
Integrale_Taux_Reconf	Intégrale du taux de progression de la connaissance en cas de reconfiguration (envergure)	1		2		2,5	
ParamExpe_a_Taux_Maxi_Reconf	Valeur de la connaissance pour le taux de progression maximal en cas de reconfiguration	50	centré	30	rapidement	50	centré
Taux_Maxi_Reconf	Progression maximale de la connaissance en cas de reconfiguration	2	faible progression	5	progression correcte	5	progression correcte
Integrale_Taux_Reorg	Intégrale du taux de progression de la connaissance en cas de réorganisation (envergure)	2		6		10	
ParamExpe_a_Taux_Maxi_Reorg	Valeur de la connaissance pour le taux de progression maximal en cas de réorganisation	30	rapidement	30	rapidement	50	centré
Taux_Maxi_Reorg	Progression maximale de la connaissance en cas de réorganisation	5	progression correcte	15	assez efficace	20	efficace

4.24 – Tableau de synthèse des conditions initiales des simulations des cas A, B et C

4.2.3.1 Aperçu des résultats de simulations pour les trois cas

Il est naturel de penser que si la quantité d'échantillons disponibles était infinie, nous finirions bien un jour par obtenir un processus, et donc une connaissance à 100 %.

Nous y parviendrions effectivement tôt ou tard mais, dans un souci de rentabilité, l'important est de réduire au maximum la durée de la période de mise en production.

Par ailleurs, la question de la quantité de microcomposants disponibles est secondaire car la surface d'un wafer est importante et le coût d'un microcomposant reste modique, quasiment négligeable. A titre d'exemple, on peut aisément obtenir trois microvaches sur un millimètre carré, et avec des diamètres de wafers standards compris entre 100 à 300 mm (450 pour le plus grand jamais construit) ce sont près de deux cent mille Maghi disponibles avec un seul wafer.

L'objectif est donc double : il faut non seulement disposer d'une connaissance satisfaisante pour envisager une mise en production à grande échelle, mais aussi s'assurer que la période d'acquisition de cette connaissance et du déploiement du procédé de production restera d'une durée raisonnable. Ce sont ces deux grandeurs que nous analysons par la suite.

Afin de comprendre les résultats des simulations, nous allons visualiser l'évolution des grandeurs du réseau à travers des figures comportant six graphiques.

Ces présentations tridimensionnelles des résultats sont fonctions :

- du numéro du microcomposant simulé - maximum à 100 microcomposants -. Il s'agit de l'axe nommé « numTour » en raison du nombre de tours que le réseau de Pétri principal effectue pour chaque simulation, soit jusqu'à ce que tous les microcomposants soient consommés, soit jusqu'à ce que la connaissance atteigne 100%.
- et du numéro de la simulation - 100 essais simulés en tout, afin d'autoriser une analyse statistique -.

Les six graphiques nous informent sur l'évolution de la connaissance, du temps simulé ainsi que sur quatre compteurs enregistrant les réussites, les échecs, les reconfigurations et les réorganisations.

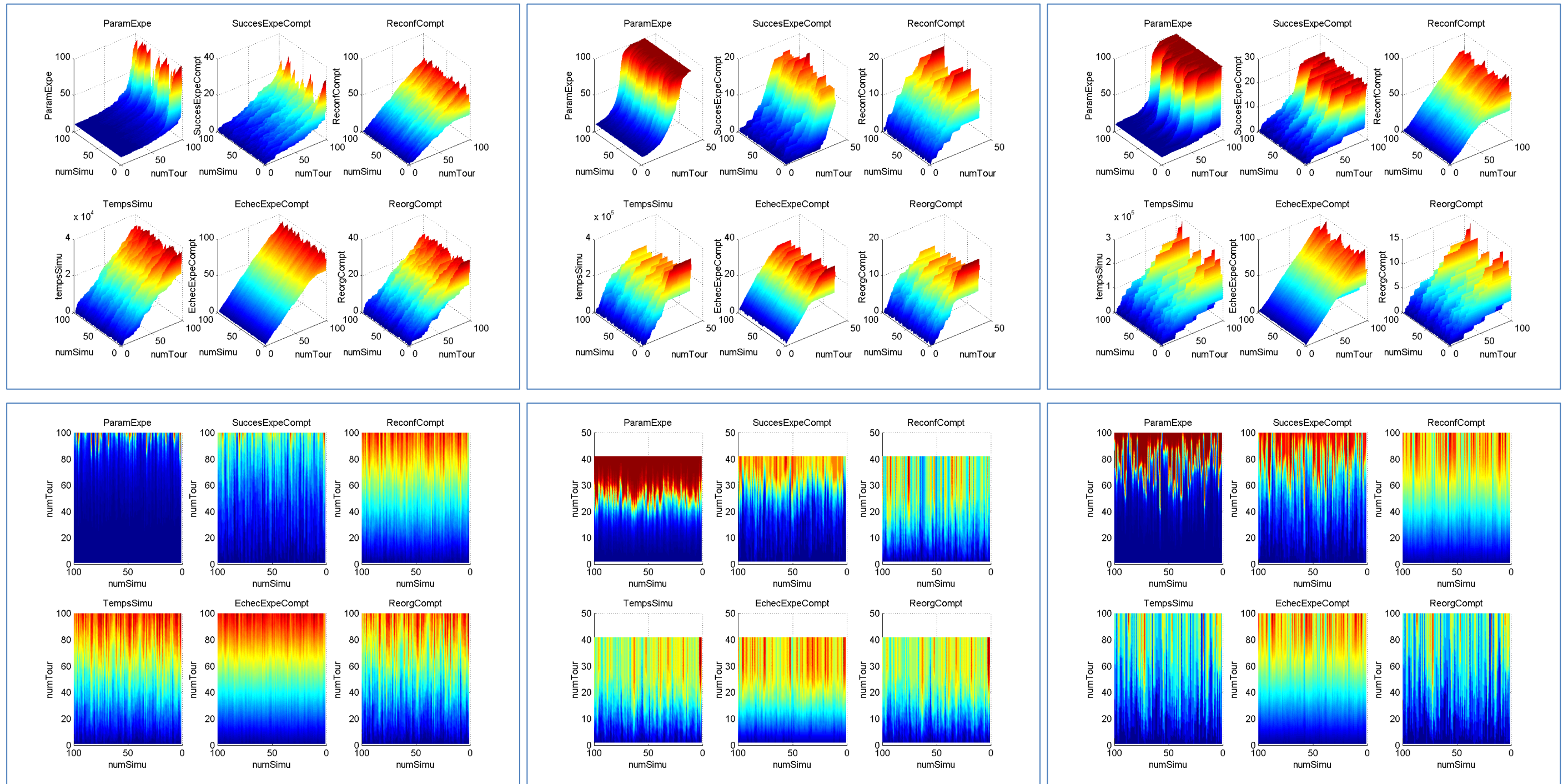
Les résultats bruts (selon l'ordre de sortie du réseau de Petri), naturellement obtenus « en vrac » puisque basés sur des tirages aléatoires, sont ensuite classés selon la finalité de l'observation. Nous disposons de trois points de vue pour les interpréter :

un premier en perspective cavalière - donne du relief mais cache certaines « vallées » -, un second orienté en vue de dessus - écrase le relief et l'échelle mais montre les vallées -, et enfin un mixte, en perspective dite frontale avec 45° d'élévation et 0° d'azimut, qui conserve le relief et montre les vallées, mais dont l'échelle est faussée.

Les trois figures suivantes présentent les résultats bruts des trois cas. Observons que la connaissance⁹ dans le cas A n'atteint quasiment jamais son maximum à 100 % contrairement aux cas B et C. La connaissance atteint plus ou moins rapidement son niveau maximum en fonction des conditions initiales. Seules quelques simulations y sont parvenues pour le cas A avec les 100 microcomposants disponibles – il en aurait fallu plus -, alors que le cas B a nécessité un maximum de 40 microcomposants et la majorité des simulations du cas C parviennent à une connaissance de 100 % avec les 100 microcomposants disponibles.

Sur les graphiques tridimensionnels suivants, l'attention doit être portée à la graduation verticale, au maximum de 100 pour les compteurs et la connaissance, mais comptabilisant jusqu'à cinq décades de facteur d'échelle pour le temps de chaque simulation.

⁹ La « connaissance » correspond au paramètre expérimental « ParamExpe » .



Cas A

Cas B

Cas C

4.25 – Visualisation 3D et frontale des résultats bruts des simulations des cas A, B, C

4.2.3.2 Comparatif de l'aspect connaissance et analyse sur le savoir-faire

Les données [fig 4.26] sont classées non pas selon la valeur maximale atteinte pour la connaissance, mais selon l'intégrale de la connaissance pour chaque simulation ; cela évite les ex-æquo et distingue les comportements « en courbes convexes », lents à démarrer, de ceux « en courbes concaves », lents à terminer. Nous proposons deux vues pour analyser l'aspect connaissance : la vue en perspective isométrique, et celle en perspective frontale - voir page suivante -. Pour chaque cas, le graphique de référence est placé en haut à gauche parmi le groupe de six.

Conclusion :

Le cas A est assez hétérogène et, en moyenne, il n'atteint que 50 % de la connaissance en utilisant tous les échantillons de microcomposants. Il se produit une sorte de « léthargie » de la connaissance que nous appelons le « marais » par opposition au « plateau » - montagneux – atteint à 100 % de connaissances.

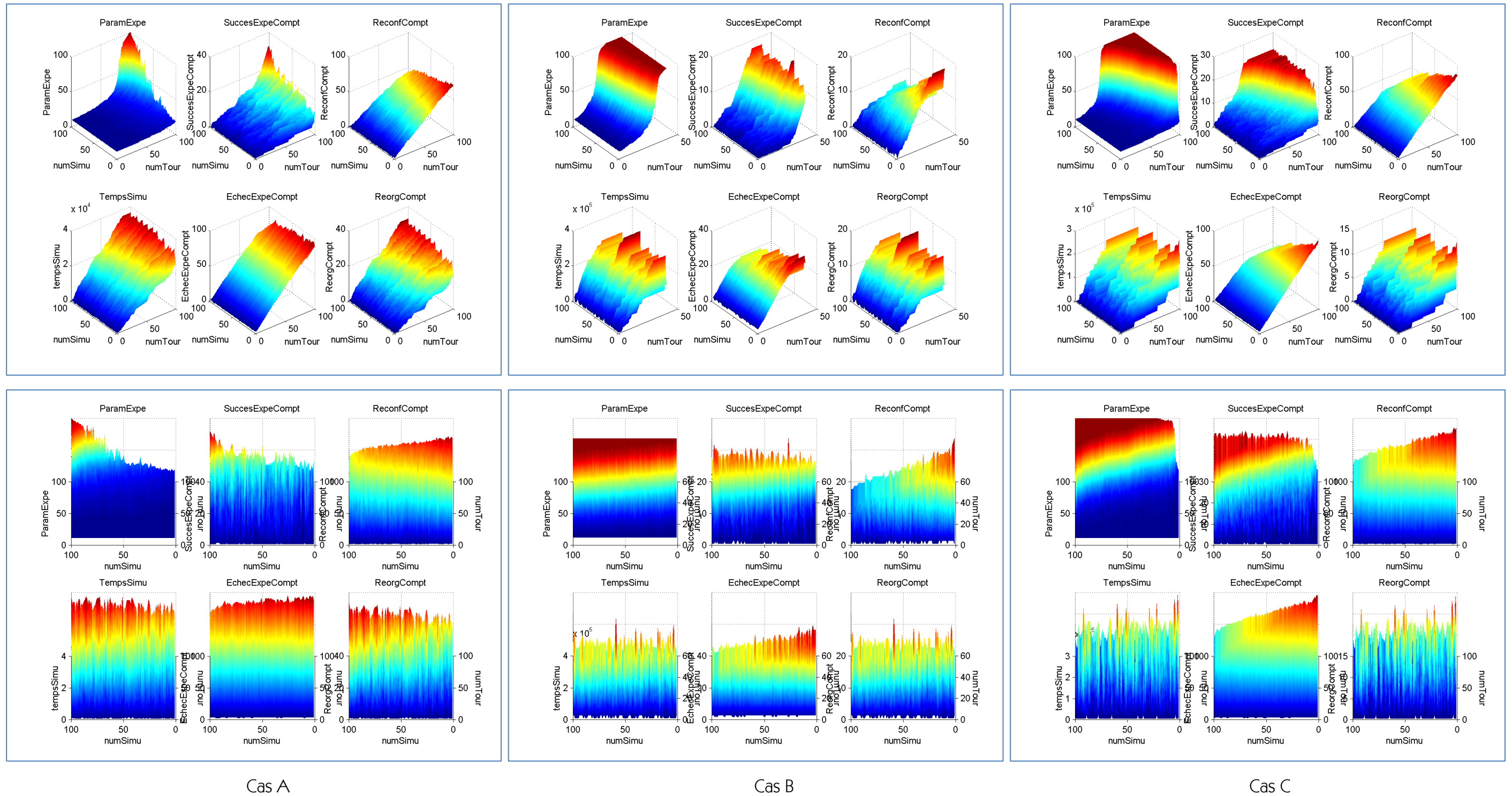
Le cas B est le plus efficace du point de vue de la consommation de microcomposants car, pour toutes les simulations, il lui en a fallu au plus une quarantaine pour atteindre 100 % de réussite – et donc de connaissances -. Nous constatons une assez bonne répétabilité de l'évolution de la connaissance lors des simulations

Le cas C parvient lui aussi à 100 % de connaissances pour quasiment toutes les simulations, mais il a requis entre 50 et 100 échantillons.

Il est cohérent d'observer que plus les succès se produisent tôt, plus vite la connaissance s'accroît et, par conséquent, atteint un niveau élevé.

Entre les cas B et C (rappelons que B est 5 fois plus curieux que C), alors que le plus curieux était estimé moins efficace (de 5 points) en cas de réorganisation, il se révèle beaucoup moins gourmand en microcomposants (60 % d'économie). Mais nous allons voir le revers de cette médaille d'ici peu.

Par ailleurs, en étudiant les compteurs de reconfiguration et de réorganisation, nous vérifions aisément que la curiosité a bien été respectée par le réseau de Petri avec une correcte proportion des quantités de reconfigurations et réorganisations.



4.26 – Visualisation 3D et frontale des résultats de simulations des cas A, B, C classés par connaissance

4.2.3.3 Comparatif de l'aspect temporel et analyse temporelle

Pour chaque cas le graphique de référence est maintenant celui en bas à gauche parmi le groupe de six - voir page suivante -. Les données sont classées selon la valeur maximale atteinte pour la durée de la simulation d'un lot de microcomposants.

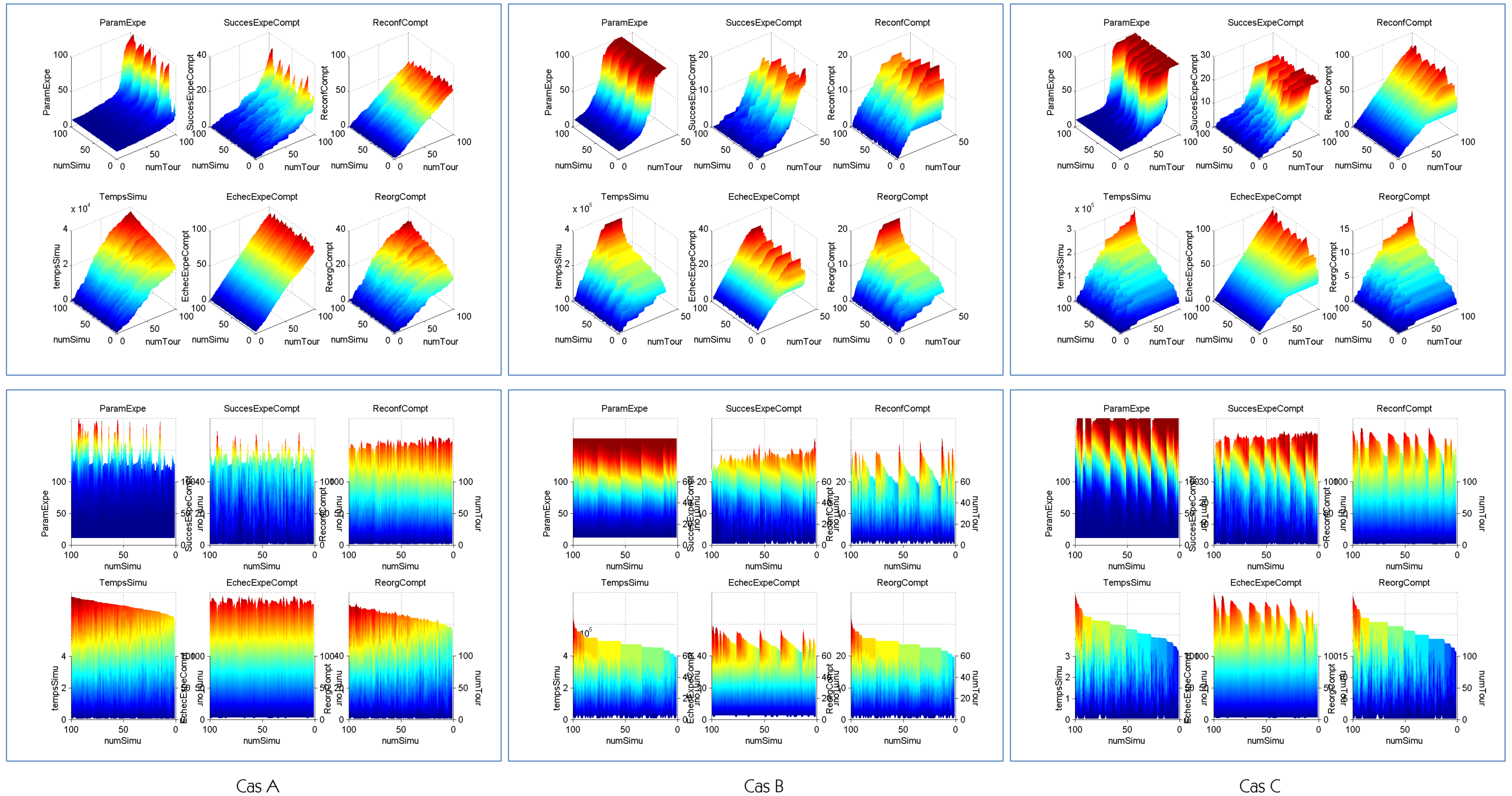
Conclusion :

Globalement il y a un facteur dix sur les intervalles de durée relatifs au cas A [20 000 ; 40 000 minutes], et aux cas B [100 000 ; 400 000 minutes] et C [50 000 ; 300 000 minutes], à l'avantage de ce premier. Cela s'explique par l'hypothèse faite d'une importance chronophage pour la réorganisation dans les cas B et C – de deux mois contre deux jours pour le cas A - ; nous retrouvons le facteur dix introduit dans les conditions initiales. D'une manière plus générale, nous observons une corrélation quasi-parfaite entre le profil du graphique de compteur de réorganisation et celui de la durée ; les retards dus aux expérimentations et reconfigurations sont peu perceptibles.

Du point de vue des ordres de grandeurs :

- le cas A nécessite entre deux et quatre mois de campagne, les « rapides » réorganisations permises par l'absence de programmation de code automatisé sont décisives ;
- il faut entre dix et quarante mois – trois ans et demie - de travail pour le cas B, soit en moyenne deux années, plus ou moins une pour les cas extrêmes (les moins probables) ;
- le cas C met entre cinq et trente mois - deux ans et demi - pour atteindre 100 % de compétences, soit en moyenne un an et demie, plus ou moins une pour les cas extrêmes (les moins probables).
- Cas B vs cas C : Bien que moins curieux – 10 % contre 50 % -, les réorganisations plus efficaces de cinq points pour le cas C que pour le B permettent un gain de temps de près de 30 % - quatre mois de gagnés en moyenne sur vingt-deux mois de durée moyenne -. Cette tendance suit une certaine logique puisque moins de réorganisation sont nécessaires pour le cas C, plus efficace. Cependant il n'en est pas de même de la consommation en microcomposants qui, nous l'avons vu lors de l'analyse du savoir-faire, nécessite entre vingt et soixante pourcent de moins pour le cas B – avec 40

contre 50 à 100 pour C -. Moins de curiosité signifie plus de reconfiguration et donc d'échecs car ayant moins de connaissance.



4.27 – Visualisation 3D et frontale des résultats de simulations des cas A, B, C classés par durée

4.2.3.4 Conclusion sur les simulations

Au vu de ce travail, force est de constater que, dans les cas B et C, les réorganisations ayant échoué sanctionnent fortement l'apprentissage car elles sont lourdes de conséquences temporelles. Cependant, ces mêmes cas B et C générant plus de connaissances que le cas A, cela nous amène à considérer avec intérêt l'efficacité nécessaire des réorganisations fortement prospectives.

C'est d'autant plus intéressant que, malgré des durées plus importantes pour le cas C - prévisible car plus curieux -, les simulations ayant abouti à un haut niveau de connaissance ont des durées proches de celles du cas B.

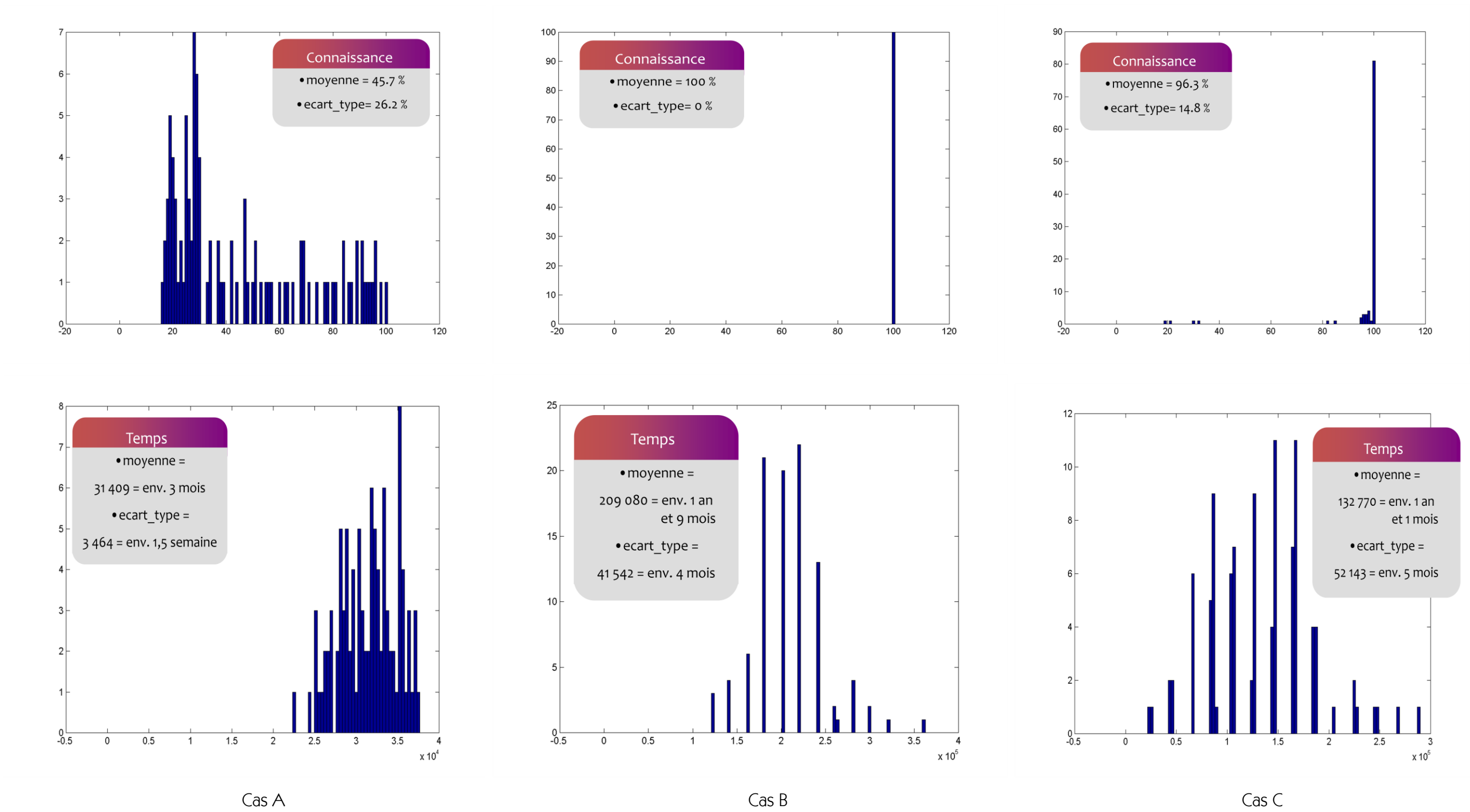
Nous avons enfin étudié la répartition statistique des résultats de simulations des trois cas afin de confirmer la tendance moyenne due aux conditions initiales, et dépendante d'un double tirage aléatoire. Il s'avère (figure 4.28) qu'avec la centaine de simulation pour chacun des trois cas, les résultats obtenus tendent à suivre une loi d'évolution Gaussienne. Cette observation est plutôt rassurante puisque nous simulons des influences de phénomènes physiques naturels et qu'ils sont généralement de nature Gaussienne, mais nous ne perdons pas de vue que seules les expérimentations seront en mesure de confirmer le modèle.

A la lumière de ces résultats de simulations relatifs à l'évolution temporelle de la connaissance d'une micro-usine, nous observons que, malgré la présence de deux tirages stochastiques de transitions, l'évolution est globalement assez franche.

La connaissance est naturellement croissante mais deux zones se distinguent :

- celle que nous appellerons le « marais » dans laquelle il est possible de s'enliser durant de nombreuses expérimentations infructueuses. Il faut tout de même relativiser car il y a aussi des leçons à tirer d'un échec ;

celle ascendante – sigmoïdale, comme attendue - qui témoigne d'une nette progression et qui sera d'autant plus rapide à atteindre que la connaissance initiale et la progression acquise à chaque réussite seront grandes. Il est ainsi conseillé d'aborder un nouveau cahier des charges de production par une micro-usine à partir de l'expérience acquise lors des campagnes antérieures. Plus il y aura de similitudes, plus la convergence sera rapide.



4.28 – Visualisation des répartitions statistiques des résultats de simulations des cas A, B, C

Pour faciliter l'interprétation des résultats de simulations et en déduire des tendances, rappelons que nous avons choisi de considérer la connaissance comme finie - à travers un pourcentage que l'on atteint à 100%, idéalement -.

Dans les faits, et tel que présenté en introduction à ce chapitre, souvenons-nous de la faible probabilité pour que cette connaissance soit pleine et entière dans un cas général. Nous préférons utiliser ici le mot « probable » car nous gardons intimement l'espoir que la Communauté scientifique parvienne à éclairer et modéliser les comportements physiques et naturels du micromonde tel que cela se fait actuellement pour les efforts de capillarité et tension de surface [[LamP03](#)].

Dès lors qu'il devient impératif de prospecter quasiment « en aveugle », du point de vue de l'efficacité et de l'ergonomie, peut-être serait-il utile d'ajouter un indicateur de « moral de l'opérateur », car, face à de trop nombreux échecs, il se peut qu'un découragement s'ensuive.

Il est donc important, d'une part de former au maximum les opérateurs pour leur permettre assez rapidement de parvenir à des réussites, et d'autre part, de les inciter à la curiosité.

Le système d'organisation possèdera un certain niveau d'intelligence et assistera l'opérateur mais l'efficacité de la réflexion humaine restera déterminante – pour combien de temps encore ? -.

Cependant, la condition est telle que cela va à l'encontre des principes habituels de reconduction d'un savoir-faire transmis, acquis à travers une formation traditionnelle. La pédagogie actuelle de la réussite ne peut pas s'appliquer ici car il faut développer une capacité à produire de nouvelles compétences.

Il appartient à l'opérateur ainsi qu'à la micro-usine de proposer de la nouveauté, d'innover. Il s'agit pour l'un comme pour l'autre de faire preuve d'originalité, peut-être même d'audace, d'opiniâtreté pour persévérer malgré des échecs successifs – la micro-usine doit s'y essayer à travers son système d'organisation -.

Ce comportement intellectuel a déjà fait ses preuves. Il nous rappelle une expérience professionnelle vécue avec une équipe d'étudiants de l'INSA-Strasbourg lors de la conception d'un drone-miniature. Après quatre années de développement, l'appareil présenté à un concours était différent de ceux de toutes les autres équipes. Sorte de bi-plans aux winglets jointifs, il s'est avéré très stable en vol et extrêmement robuste

de par sa continuité structurelle et sa construction en composite-carbone, au point de pouvoir « atterrir tel un aigle en chasse qui roule comme un judoka ». Cette solution, pour le moins originale, a fortement surpris et même plu au jury d'experts qui ne pouvait que constater son efficacité aéronautique.

Sur un aspect méthodologique, il sera judicieux de s'appuyer sur les techniques d'aide à la résolution de problèmes, telle la méthode TRIZ et ses nombreux outils. Il sera cependant peut-être nécessaire de faire évoluer ces outils avec la physique particulière du micromonde.

Finalement les compétences requises pour un opérateur sont celles que l'on met en œuvre lors d'une démarche de recherche, dans laquelle il faut explorer, défricher là où personne ne s'est jamais aventuré.

4.3 Vers une implémentation des modèles en vue du pilotage

- Extension à l'application sur stations -

Après avoir simulé des scénarii d'évolution relatifs à la connaissance d'une micro-usine confrontée à une nouvelle fabrication et montré le réalisme du concept proposé, il s'agit de permettre la migration des modèles de fonctionnement des divers constituants de la micro-usine vers un système opérationnel.

Dans le cadre du projet PRONOMIA de micromanipulation en milieu liquide, réalisé au sein de l'équipe SAMMI du département AS2M du laboratoire, il a été conçu et développé par David Hériban, conjointement à nos travaux, une interface de pilotage ouverte et modulable [Hér07]. Cette interface logicielle baptisée AP2M pour « Application pour le Pilotage de MicroManipulations » a été pensée dans le but d'offrir à l'opérateur une grande facilité d'utilisation tout en lui conférant un maximum de possibilités.

La flexibilité attendue pour permettre les reconfigurations et les réorganisations nécessaires à une micro-usine a été le cœur du développement.

A partir d'une fenêtre principale, l'opérateur est capable de configurer une station de télé-opération par la création de modules de pilotage qui sont des images des modules physiques réels présents dans l'architecture matérielle.

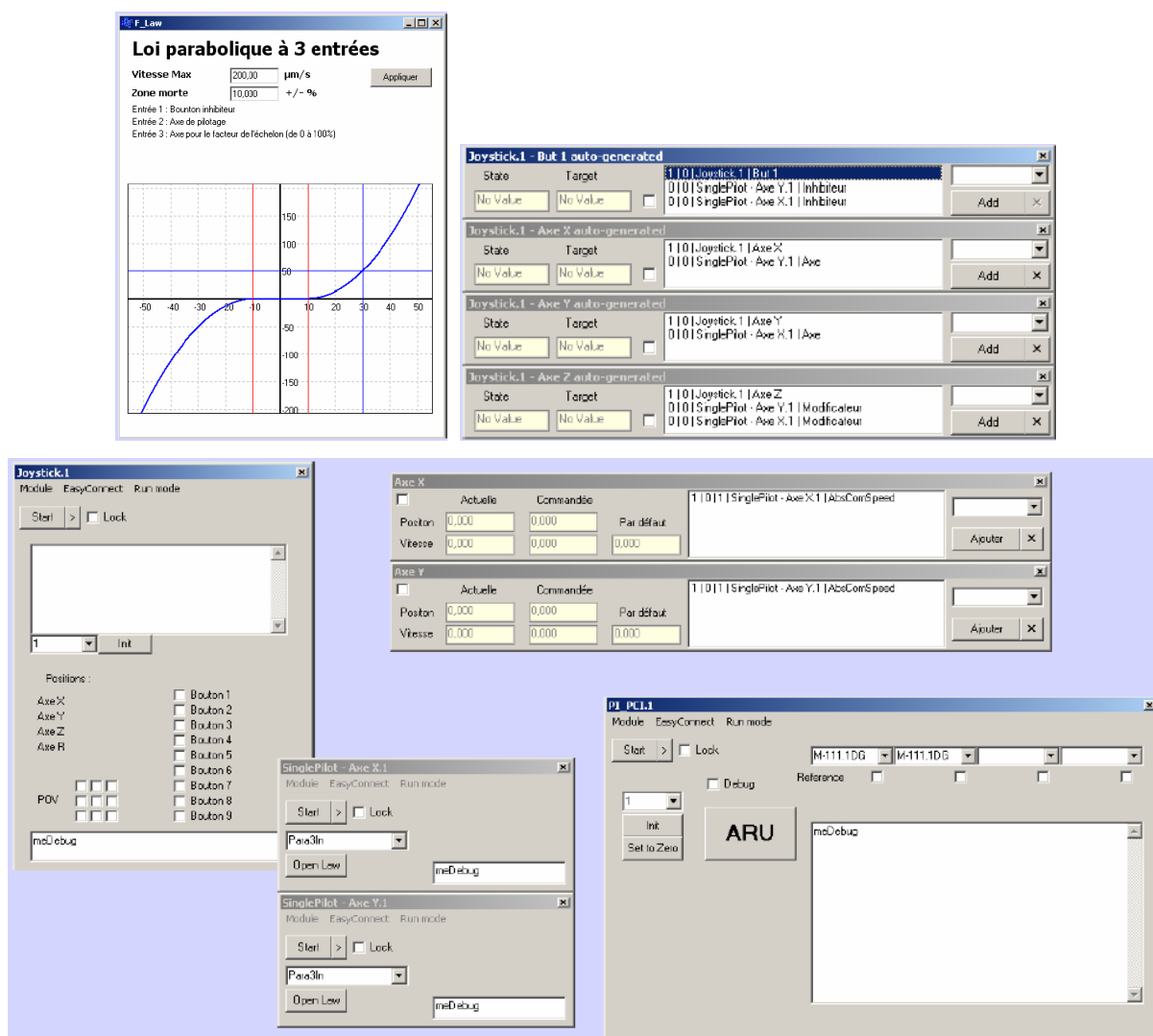
A l'écran, chaque module dispose d'une fenêtre de configuration dans laquelle sont définies ses caractéristiques intrinsèques et surtout ses liens avec les autres modules. L'ensemble des fenêtres propres au matériel mis en œuvre par la micromanipulation forme à l'écran une station virtuelle amenée à évoluer au fur et à mesure des apprentissages et de l'évolution des savoir-faire. Basée sur une architecture développée en Programmation Orientée Objet - POO -, les diverses entrées-sorties de l'IHM, ainsi que les entrées-sorties de terrain au sein du micromonde - partie opérative - sont encapsulées dans des fichiers de type Librairie de Liens Dynamiques « .dll » - Dynamic Library Link ou Bibliothèque de Liens Dynamiques -. Cette dll peut contenir du code ou des ressources rendus alors disponibles à d'autres applications.

Ainsi, selon la configuration matérielle de la station de « micromanipulation par télé-opération », la fenêtre d'application principale charge les dll adéquates. Au-delà du gain d'espace mémoire utilisée, cette technique permet de dissocier

géographiquement et temporellement la conception d'un module de la génération de l'application principale.

Un avantage non négligeable de cette solution est la mutualisation possible des développements réalisés par diverses personnes à partir d'un canevas commun, base standard de multiples développements.

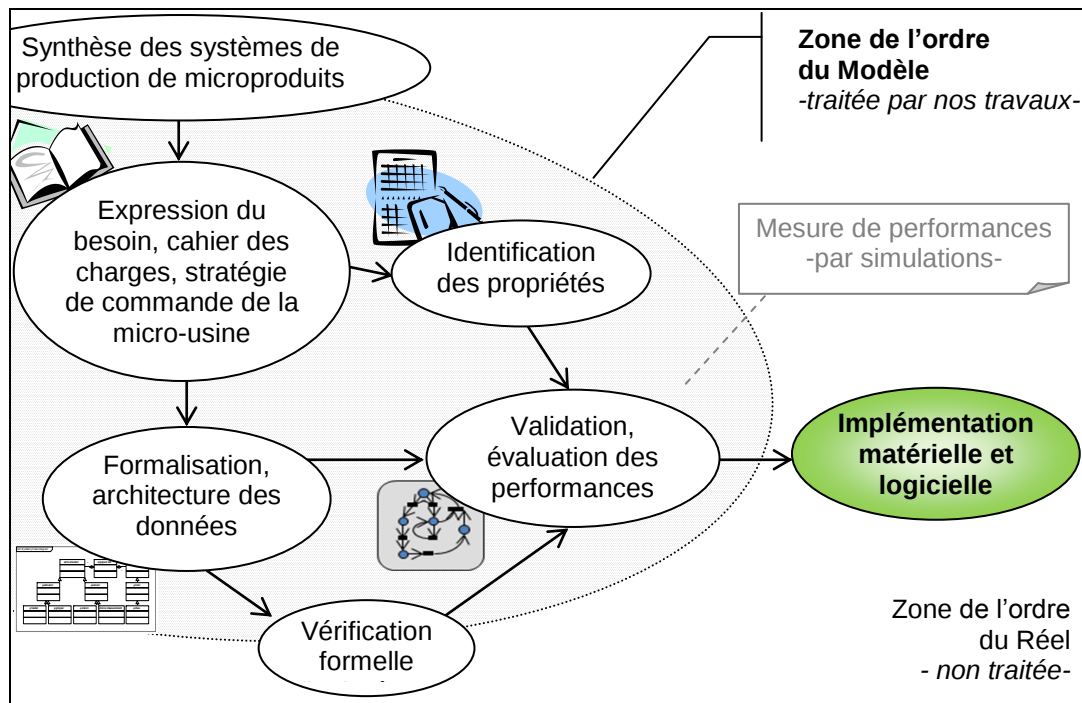
Par ailleurs, l'application principale de base permet une standardisation des interfaces de pilotage au-delà d'un laboratoire comme le nôtre. Ce dernier a initié le déploiement de l'AP2M sur plusieurs nouvelles stations, mais également lors de mise à jour d'autres moyens de prototypage.



4.29 - Illustration de l'interface graphique de l'AP2M

La finalité initiale de ce logiciel AP2M est l'association des organes d'IHM - de télé-pilotage : manette, vues sur écrans - avec les organes du micromonde - actionneurs et capteurs -.

Cette télé-opération n'est qu'une étape nécessaire au développement du concept de micro-usine automatisée, car, en complément de l'IHM, il faut expérimenter le système d'organisation complet, exploitant les savoir-faire acquis antérieurement. Cette dernière étape d'implémentation fait l'objet des prochains travaux menés conjointement par notre laboratoire et la jeune société « percipio-robotics » fondée par David Hériban [Hér] et en cours d'incubation à la Maison des microtechniques de la Technopole Microtechniques et Scientifiques de Besançon - TEMIS -.



4.30 - Méthodologie de travail, étape d'implémentation

4.4 Conclusion sur la mise en œuvre de la validation

La validation présentée a consisté à quantifier les aptitudes des principales propriétés attendues - de connaissance et de durée -. Ces résultats, obtenus par simulation via un réseau de Petri stochastique et T-temporisé, sont relatifs à des conditions initiales identifiées à travers les expérimentations de terrain, menées en micromanipulation et micro-assemblage par les acteurs majeurs du LEA Microtechnique. L'indéterminisme du micromonde est simulé par la probabilité de tir de deux transitions. L'évolution chronologique - principalement influencée par les expérimentations, les reconfigurations et les réorganisations successives - est reflétée par trois temporisations de transitions.

Il ressort de ces simulations que le système organisation et l'opérateur doivent tous deux être aptes à prendre des décisions afin de couvrir de larges prospections, en persévérant malgré des échecs successifs.

De nouveaux savoir-faire seront acquis à partir d'une autonomie décisionnelle garante d'initiatives complétant les connaissances antérieures. Des volontés de réorganisation dépendent la durée d'établissement d'une gamme de production, mais surtout la fiabilité de cette gamme. Les simulations ont montré qu'il était nécessaire de s'autoriser quelques sacrifices temporels, pour suffisamment approfondir la connaissance de la (des) micromanipulation(s) et du(des) micro-assemblage(s), et ainsi réduire l'apparition des aléas imputables à la physique du micromonde.

L'implémentation de ces modèles de fonctionnement est la prochaine étape de développement, notamment à travers l'interface de pilotage AP2M. Elle sera un premier pas vers l'automatisation de l'organisation des cellules et, plus généralement, de la micro-usine.

L'assistance à l'organisation de la gamme intervient en amont ; elle est complémentaire à l'automatisation locale des cellules de production – e.g. grâce à l'asservissement visuel -.