Des *artefacts* aux *instruments*, une approche pour *guider* et *intégrer* les usages des outils de calcul dans l'enseignement des mathématiques

Luc Trouche
Professeur des universités, INRP & LIRDHIST (Université Lyon 1)

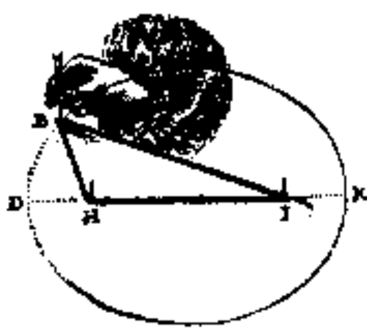
[DEUXIÈME PARTIE DE L'ARTICLE]

II. Des outils aux instruments du travail mathématique

Parmi les approches théoriques apparues, dans la dernière période, pour aborder l'étude des processus d'apprentissage dans les environnements informatiques, l'une apparaît particulièrement fructueuse : *l'approche instrumentale*.

A. L'approche instrumentale

Cette approche théorique, qui repose sur l'idée d'un apport fondamental des outils pour les activités et les apprentissages humains, n'est pas nouvelle. Sans remonter à la *technè* de Platon, on la retrouve dans les relations entre Descartes et les artisans (Figure 7) ou, pour l'Encyclopédie de Diderot, dans l'inventaire des *savoir-faire*, mis à égalité avec les savoirs nobles (rappelons que le sous-titre de l'Encyclopédie est *Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*).



L'ellipse est une ligne courbe que j'ai vu dessiner par les jardiniers dans leurs parterres, où ils la décrivent d'une façon fort grossière, mais qui fait mieux comprendre sa nature

Descartes, La Dioptrique, Discours VIII, 1637

Figure 7. Une illustration de l'importance que Descartes accorde à la pratique instrumentée

Héritier de cette tradition, Vygotski (1934) situe tout apprentissage dans un monde de *culture* où les *instruments* (matériels et psychologiques) jouent un rôle essentiel. Partant de ce point de vue, Rabardel (1995), dans le cadre de l'ergonomie cognitive et de la didactique professionnelle, développe une approche théorique qui, pour l'essentiel, distingue *l'artefact* (c'est-à-dire l'outil « nu », qui est proposé à un utilisateur potentiel) et *l'instrument*, qui est le résultat d'un *processus* d'appropriation, par une personne donnée, dans la confrontation à des situations données (Figure 8). Cette distinction est fondamentale :

- elle met en évidence que les artefacts ne sont que des *propositions*, qui seront développées, ou non, par un sujet ;
- elle met en évidence que ce développement se fait au cours d'un processus, la *genèse instrumentale*, où *l'activité* de l'usager et le *contexte* de cette activité sont décisifs ;
- elle met en évidence que tout instrument a une *partie matérielle* (c'est la part de l'artefact qui a été sollicitée au cours de l'activité) et une *partie psychologique* (c'est l'organisation de l'activité, dans un but donné, ce que Vergnaud, après Piaget, appelle les *schèmes*).

Un instrument est ainsi le produit d'une *histoire* : on parlera, à un moment donné, de l'instrument que l'élève x a construit, à partir d'un artefact y, dans un environnement z, pour réaliser une tâche t.

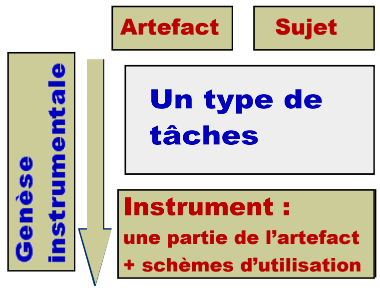


Figure 8. La construction d'un instrument, par un sujet donné, à partir d'un artefact donné

Dès lors que l'on veut appliquer ce modèle, on réalise que les choses sont un peu plus complexes :

- considérons par exemple le type de tâches « déterminer la limite d'une fonction en + ∞ », dans un environnement de calculatrices graphiques, en classe de première scientifique. L'utilisation d'une calculatrice graphique permet, avec l'application graphique ou l'application numérique, d'avoir des informations sur les valeurs que prend la fonction pour x grand. L'utilisation des techniques apprises en cours permet par ailleurs (en général) de déterminer, dans un environnement papier-crayon, la réponse à cette question. La réalisation de cette tâche peut ainsi passer par une combinaison d'une technique calculatrice (pour anticiper ou vérifier) et d'une technique papier/crayon. Pour certaines limites (Figure 9), cette combinaison n'a d'ailleurs rien d'évident et peut susciter des difficultés importantes (Guin & Trouche 2002). La genèse d'un instrument se fait ainsi souvent à partir non pas d'un seul, mais *d'un ensemble d'artefacts* (ici une calculatrice et le papier/crayon) ;

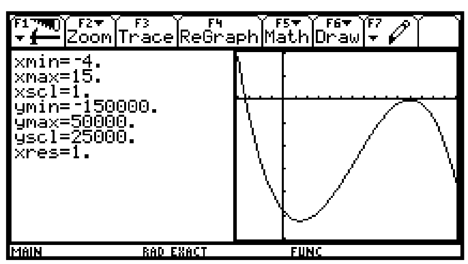


Figure 9. Une représentation de $P(x) = -121011 - 14290{,}1989\,x + 5601{,}73023\,x^2 - 300{,}56003\,x^3 + 0{,}03\,x^4$

- l'environnement social dans lequel un type de tâche va être réalisé entre évidemment en compte. La construction des instruments dans une institution, la salle de classe, combine nécessairement des aspects individuels et sociaux. De plus, dès lors qu'il s'agit d'artefacts, comme les calculatrices, qui ne sont pas liés à la seule salle de classe, ceux-ci pourront être mobilisés dans des conditions très différentes : dans la classe, avec ou sans le contrôle du maître, avec les copains, seul chez soi, etc. Dès lors, il est tout à fait possible que, pour un même individu, *pour une même tâche*, des instruments différents soient construits : il s'agira alors *d'articuler* de façon cohérente un ensemble d'instruments…
- le travail mathématique suppose le traitement d'un *ensemble de tâches différentes* (par exemple : étudier les variations d'une fonction, résoudre une équation ou une inéquation, étudier des limites…). Un élève va donc construire un ensemble d'instruments et tout le problème sera, là aussi, *d'articuler* ces différents instruments.

B. Instrumentation et instrumentalisation, deux processus duaux

Rabardel (ibidem) distingue, dans la genèse d'un instrument, deux processus croisés (Figure 10), *l'instrumentation* et *l'instrumentalisation* : l'instrumentalisation est relative à la *personnalisation* de l'artefact par le sujet, l'instrumentation est relative à l'émergence des schèmes chez le sujet (c'est-à-dire à la façon avec laquelle l'artefact va contribuer à *préstructurer* l'action du sujet, pour réaliser la tâche en question). Ces deux processus sont imbriqués, simultanés, mais les distinguer est utile pour bien comprendre la genèse des instruments.

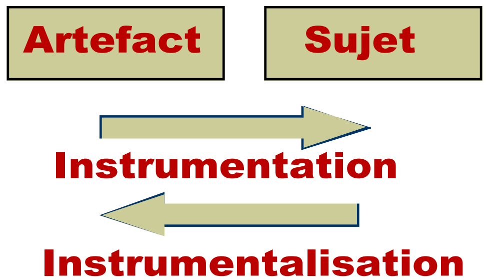


Figure 10. La genèse instrumentale, comme combinaison de deux processus duaux

1. L'instrumentation.

Reprenons l'exemple de l'étude des limites de fonctions dans un environnement de calculatrices graphiques. Avoir « une idée » de la limite d'une fonction en $+\infty$ en utilisant ce type d'artefact peut passer par différentes techniques (par exemple regarder les valeurs numériques que prend la fonction pour de grandes valeurs de la variable ou considérer la représentation graphique de la fonction pour de grandes valeurs de la fonction). Pour chacune de ces techniques, il est possible de réaliser différents gestes (par exemple, dans l'application graphique, choisir une plage pour la variable [0 ; 1000], ou une plage [1000 ; 2000]…). Pour des raisons *d'économie* du travail mathématique, petit à petit vont être sélectionnés les gestes paraissant les plus efficaces pour répondre à la question posée : un schème de calcul de limite, c'est-à-dire une organisation invariante de l'activité pour résoudre ce type de tâche, va émerger.

Ce schème incorpore des propriétés, que Vergnaud appelle *théorèmes-en-acte*, qui découlent de cette organisation de l'action. Ces théorèmes-en-acte sont souvent implicites, ils ont une validité dans un certain domaine, cette efficacité relative explique leur incrustation. Ainsi, pour la recherche de limite appuyée sur des considérations graphiques, j'ai repéré (Guin & Trouche 2002) ce théorème-en-acte : *pour qu'une fonction ait une limite infinie en $+\infty$, il faut que, à partir d'un certain moment, elle soit croissante*. Il découle évidemment de l'organisation des gestes réalisés par l'élève (regarder la courbe pour des grandes valeurs de la variable), dans de contexte des fonctions de référence que les élèves rencontrent au lycée. Cette incrustation résiste souvent à des contre-exemples : ainsi il est tout à fait frappant de constater que de nombreux élèves, dans des environnements de calculatrices graphiques, estiment que la fonction $x \mapsto \ln x + 100 \sin x$ (Figure 11) n'a pas de limite en $+\infty$, du fait de ses oscillations (Guin & Trouche 2002).

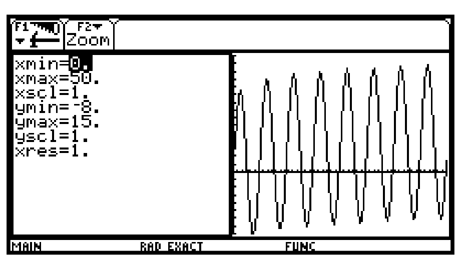


Figure 11. Une représentation graphique de la fonction qui, à x, associe ln x + 100 sin x

L'instrumentation, c'est donc ce processus par lequel les *contraintes* et les *potentialités* d'un artefact vont conditionner durablement l'action d'un sujet pour résoudre un problème donné. Il n'y a pas *d'automaticité* stricte, un même artefact ne va pas structurer nécessairement la même activité chez deux individus différents : il va rencontrer des habitudes de travail antérieures, des connaissances différentes qui vont jouer aussi dans le choix des commandes et de leur enchaînement et donc dans les nouvelles connaissances, les théorèmes-en-acte, qui vont être construites. Mais la façon dont un artefact est structuré va *induire* plutôt telle ou telle organisation de l'action. Pour comprendre ce processus, l'analyse de l'ergonomie d'un artefact est nécessaire : comment sont organisées les touches, les menus, les commandes ? Il est intéressant de constater, par exemple, que, sur une calculatrice *graphique*, ce sont en général les touches *graphiques* qui sont d'accès direct et que les touches numériques sont « cachées » *derrière* les touches graphiques (on y accède par une combinaison de touches). C'est bien une prescription – relative – pour une étude graphique plutôt que numérique des phénomènes.

2. L'instrumentalisation.

L'instrumentalisation est un processus de *personnalisation* de l'artefact, c'est donc un processus de *différentiation* des artefacts, par lequel chaque usager met cet artefact *à sa main*. Tous les professeurs en connaissent des manifestations dans l'univers des calculatrices : stockage de jeux, de théorèmes, personnalisation de la barre de menus, installation de programmes spécifiques téléchargés sur Internet (Figure 12).

Ce processus peut être considéré comme un *détournement* ou comme une *contribution* de l'usager au processus même de *conception* de l'instrument.

Figure 12. Une variété infinie de personnalisation des menus

Fans le cadre de l'approche instrumentale, c'est cette deuxième considération qui prévaut naturellement, ce qui ne veut pas dire bien sûr qu'il convient d'affecter une valeur positive à tout ce que fait un élève avec les artefacts qu'il utilise et à toutes les transformations qu'il leur fait subir. Mais cela veut dire que, comme ce ne sont pas les *artefacts* que l'on veut intégrer dans la classe (cela n'aurait pas de sens, les artefacts ne sont que des propositions non incarnées), mais les *instruments* construits par les élèves, on ne peut ignorer la *dynamique* de cette construction.

Ce point de vue a deux conséquences majeures :

- une conséquence *pédagogique* : l'intégration des instruments suppose le *suivi*, relatif (le professeur ne peut pas tout voir) des processus d'instrumentalisation pour tenter, quand c'est possible, d'en faire un ressort d'un élargissement des instruments de l'ensemble des élèves. Par exemple, confrontés à l'utilisation d'une calculatrice pour stocker des théorèmes, on pourrait, collectivement, poser le problème de la *structuration* des données du cours dans la calculatrice, pour une optimisation de ce stockage et de son exploitation ultérieure ; à travers cette réflexion, c'est bien d'une re-vision du cours et de sa réorganisation qu'il s'agit. De plus, en prenant en compte la personnalisation, par un élève, des artefacts qu'il utilise, le professeur facilite, en retour, l'appropriation, par le même élève, des gestes et des techniques instrumentées qu'il lui proposera ;

- une conséquence en matière *d'ingénierie des artefacts* : l'idée que la conception des artefacts s'enrichit à travers ses usages suggère que le processus même de conception se poursuit à travers les usages. Il ne s'agit plus de faire un prototype, de le tester, et de passer à une phase opérationnelle, mais bien plutôt de prévoir une conception d'artefacts comme nécessairement itérative, alternant des *phases de réalisation* et des *phases de mise en œuvre*.

C. Complexité et dispersion des genèses instrumentales

Les instruments se construisent au cours des usages et donc se différencient. Plus, les recherches ont montré que cette différentiation augmentait avec la complexité des artefacts en jeu : le passage d'un environnement de calculatrices graphiques à un environnement de calculatrices symboliques a mis en évidence (Guin & Trouche 2002), pour certains élèves, un *développement* des instruments (*enrichissement* et *articulation* des techniques mises en œuvre), pour d'autres élèves un *affaiblissement* de ces instruments (*appauvrissement* et *cloisonnement* des techniques).

On a montré par exemple, sur un exemple de dérivée nième que le logiciel ne peut pas réaliser directement (Figure 13), la diversité des connaissances nécessaires pour résoudre le problème (savoir saisir des données, organiser et analyser l'information, faire appel à des connaissances antérieures, inférer, contrôler des résultats). Les écarts sont donc grands entre un élève qui n'arrive même pas à saisir les données, un élève qui saisit les données et fait défiler les résultats successifs sans prendre le temps de chercher des régularités (le phénomène de *pêche* déjà évoqué) et un élève qui conjecture une formule générale à partir d'une observation raisonnée des résultats successifs et utilise le logiciel de calcul formel pour une preuve par récurrence…

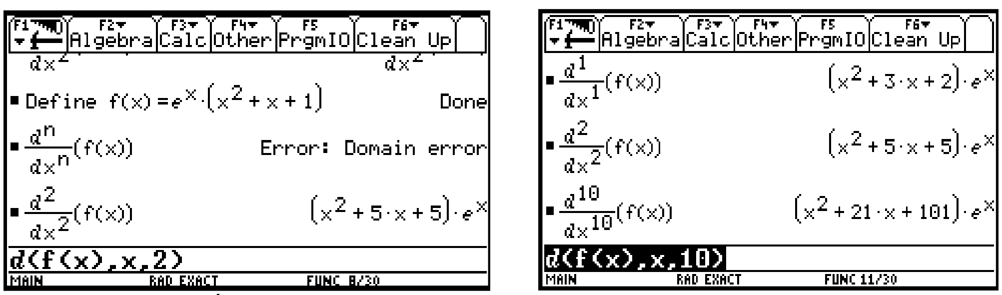


Figure 13. Éléments recherche de la dérivée nième d'une fonction donnée

Cette dispersion des instruments, à mesure de la complexification des environnements, constitue un fait majeur qui souligne la nécessité, pour le professeur, de mettre en œuvre des dispositifs permettant de *suivre* l'évolution des genèses instrumentales et de *socialiser*, pour partie bien sûr, ces processus.

III. La complexité des tâches du professeur de mathématiques

Comme l'ont mis en évidence les recherches récentes (§ ID4), les tâches du professeur, dans des environnements technologiques riches, sont fort complexes. Il ne s'agit pas ici d'envisager toute l'étendue de *l'action didactique* du professeur (Sensevy & al 2000), mais uniquement des éléments de celle-ci en relation avec la gestion des artefacts présents dans l'environnement de l'étude.

A. Connaître les *potentialités* et les *contraintes* des artefacts

Cette première tâche est déjà très complexe, dès lors que l'on a affaire à des artefacts intégrant différentes applications, pour lesquelles la transposition informatique (§ ID&) produit des effets qu'il est difficile de contrôler. Bernard et al (1999) ont donné de nombreux exemples de ces effets pour des calculatrices symboliques. On peut voir par exemple (Figure 14) que l'identification, par la calculatrice, de deux expressions égales peut se faire, ou non, suivant que l'on formule la demande en calcul formel ou en calcul numérique (le problème est évidemment qu'il ne reste pas trace sur l'écran du contexte dans lequel a été formulée cette demande). Sur l'écran de droite, l'identification des deux expressions ne se fait que si l'on « aiguille » l'application de calcul formel en appliquant la commande *expand* à l'un des deux membres.La coexistence de deux réponses contradictoire (*true* et *false*), pour la même question, a évidemment de quoi semer le trouble chez les élèves, pour une discipline dont un des objectifs est précisément de donner des moyens pour départir le vrai du faux !

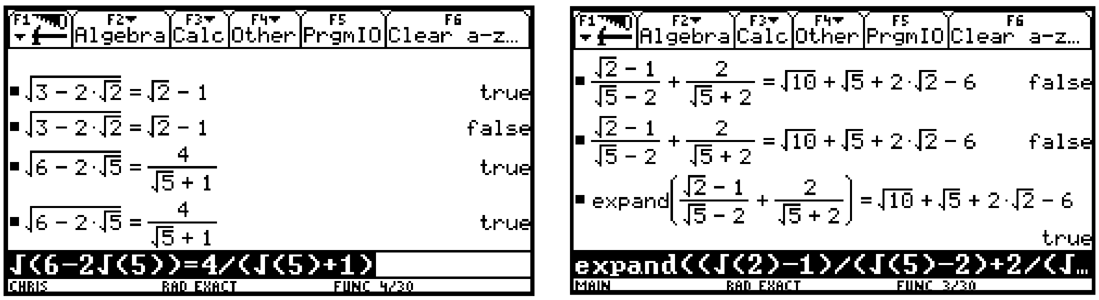


Figure 14. Complexité des traitements algébriques qu'opère une calculatrice symbolique

Il est bien sûr impossible pour un professeur de connaître dans le détail le fonctionnement des artefacts présents dans la salle de classe. Mais une réflexion de fond sur *une instrumentation raisonnée* (Elbaz-Vincent in Guin & Trouche 2002) s'impose :

- pour concevoir les situations mathématiques ;
- pour anticiper les difficultés des élèves ;
- pour prévoir, relativement, les directions dans lesquelles les processus d'instrumentation et d'instrumentalisation vont se déployer.

B. Concevoir des *situations*

Nous avons vu au § ID3 la nécessité, pour la conception des situations, de prendre en compte à la fois la connaissance visée et l'environnement technologique. En voici un exemple, en terminale scientifique, dans un environnement de calculatrices symboliques (Trouche 1998). Il s'agit de construire une connaissance profonde : $\lim_{x \to +\infty} \frac{e^x}{x^n} = +\infty$ signifie que $\frac{e^x}{x^n}$ peut être aussi grand que l'on veut dès lors que x sera suffisamment grand. La situation conçue dans cet objectif est la résolution de l'équation $e^x = x^{20}$ (Figure 15). Le choix de l'exposant ne relève pas du hasard : le concepteur de la situation sait que, pour l'artefact qui sera mobilisé, l'algorithme de résolution numérique de cette équation ne trouvera que deux solutions (proches de – 1 et de 1). Il sait aussi que, pour des fenêtres graphiques standards, l'existence d'une troisème solution apparaîtra largement improbable. Lever le mystère qui entoure la représentation graphique (la représentation graphique de la fonction exponentielle finira-t-elle par « rattraper » celle de la fonction puissance – ce qui n'apparaît pas du tout évident dans une fenêtre standard) suppose de donner un contenu *correct* et *concret* à la propriété $\lim\limits_{x \to +\infty} \frac{e^x}{x^n} = +\infty$: $\frac{e^x}{x^n}$ peut être aussi grand que l'on veut pour x suffisamment grand, donc finira par dépasser définitivement 1, ce qui dissipe le mystère. La certitude de l'existence ne permet pas pour autant la localisation de la troisième racine. La résolution de ce problème, autant théorique que pratique, nécessite de modifier l'expression du problème, en passant, pour x strictement positif, à l'équation équivalente $x = 20 \ln x$: cette transformation facilite à la fois l'étude théorique (le signe de la dérivée de la fonction qui à x associe $x - 20 \ln x$) et la localisation pratique de la solution cherchée, en donnant à traiter des fonctions à croissance « raisonnable ».

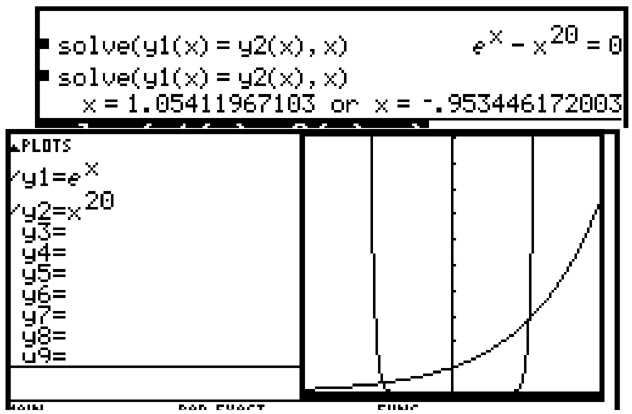


Figure 15. Traces de la résolution de l'équation $e^x = x^{20}$

Concevoir de telles situations n'est pas simple. Il est clair qu'il ne s'agit pas de situations conçues dans un environnement papier/crayon que l'on aurait transposées dans un environnement de calculatrices symboliques. L'environnement est le *cadre de conception* de la situation. C'est ce qui explique que, s'il existe désormais un grand nombre de situations se proposant d'intégrer les TICE dans le cours de mathématiques (sites académiques, portail ministériel des TICE pour l'éducation, ressources IREM sur le site PUBLIREM, ressources de Sésamath…), la plupart d'entre elles intègrent seulement les TICE dans une démarche *d'exploration* ou de *vérification :* il est difficile de concevoir des situations mathématiques pour lesquelles les TICE fassent *partie intégrante* du problème, c'est-à-dire donnent le caractère *mystérieux* et de *défi* de la situation et *assistent* le processus de résolution jusqu'à son terme.

C. Concevoir des *scénarios* pour mettre en œuvre les situations

Les situations sont difficiles à concevoir, elles sont aussi difficiles à mettre en œuvre dans la classe. Chevallard, en 1992, signalait déjà que ce qui manquait principalement, ce n'était pas les logiciels, ni les situations mathématiques, mais, en utilisant une métaphore informatique, le *système d'exploitation* de ces situations dans des environnements technologiques donnés. Plus simplement, nous dirons ici qu'il est nécessaire de préciser des *scénarios* donnant des éléments d'organisation du temps et de l'espace pour la mise en œuvre de la situation dans la classe. La prise de conscience de la nécessité de ces scénarios est apparue depuis quelques années en ce qui concerne l'intégration de logiciels conçus *pour* l'enseignement, par exemple Cabri (Capponi 1998). On trouve, depuis, un certain nombre de *scénarios pédagogiques* accompagnant des situations. Ils précisent en général le *découpage temporel* en différentes *phases* de la situation et leurs *modes de gestion* : durée et nature de chaque phase (exploration, validation, travail de la technique…), organisation de la classe (en petits groupes, par binôme, …), en relation avec le problème posé. Par exemple, si un professeur veut exploiter dans sa classe la situation présentée au paragraphe précédent, il utiliserait sans doute volontiers, pour préparer la séance, des suggestions de mise en œuvre précisant la façon de découper le temps et d'organiser, dans chaque phase, le travail des élèves, et des conseils méthodologiques annonçant des difficultés prévisibles et donnant des conseils pour y faire face.

Si l'on parcourt les différents types de scénarios pédagogiques qui sont proposés dans des documents d'accompagnement de situations mathématiques, un élément apparaît transparent, comme s'il allait de soi, alors que c'est une des sources de difficulté majeure : quelle est la *gestion didactique des artefacts* présents dans l'environnement ? Pour mettre en évidence un manque et désigner sa nécessité, il faut un nom : j'ai nommé *orchestration instrumentale* cette gestion didactique (Trouche 2005). Elle n'est pas seulement liée à un environnement donné : elle dépend aussi de la *situation* que l'on veut mettre en œuvre et de ses propres *intentions didactiques*. Une orchestration est définie par des *configurations didactiques* et leurs *modes d'exploitation*. Ainsi la configuration de *l'élève-sherpa* (Figure 16), qui repose sur l'attribution d'un rôle particulier à un élève de la classe, dont la calculatrice est rétroprojetée sur l'écran de la classe, peut-elle être associée à différents modes d'exploitation (liés au choix de l'élève, à la durée de ce rôle, au cahier des charges que le professeur attribue à cet élève et aux autres, à l'articulation de ce qui apparaît à l'écran collectif et de ce que le professeur écrit au tableau, à l'articulation entre ce que les élèves font sur leur table avec leur calculatrice et sur leur cahier, au type de débat organisé dans la classe, etc…).

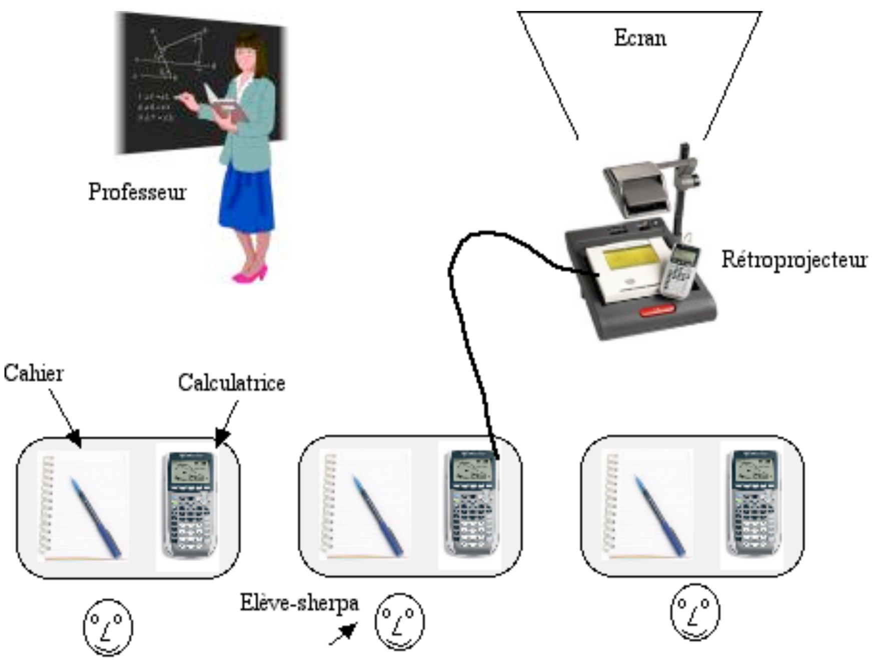


Figure 16. La configuration de l'élève sherpa, facilitant une certaine socialisation des genèses instrumentales

La métaphore de l'orchestre convient bien à un environnement *d'instruments* en développement. Elle est aussi utile pour traduire le rôle du professeur : *chef d'orchestre* plutôt qu'*homme-orchestre*. Elle rend compte aussi des différentes possibilités dont le professeur dispose : une formation d'o*rchestre symphonique* pour certaines phases de la situation, une formation de *groupe de jazz* pour d'autres, ainsi que le définit Bril (2002) : *Dans un groupe de jazz, une improvisation musicale émerge d'un va-et-vient continu entre chaque musicien, dans un jeu d'ajustements réciproques permanents, le chef d'orchestre ayant un rôle de mise en forme, en phase, de l'ensemble*.

Il est cependant clair que l'évolution des environnements technologiques rend à la fois nécessaire et possible un fonctionnement sur le mode jazz plutôt que symphonique :

- nécessaire car les artefacts complexes favorisent une grande variété de processus d'instrumentalisation. Si l'on veut à la fois contrôler la personnalisation des artefacts et enrichir l'instrument collectif des variations de chacun (l'idée de conception dans l'usage, § IIB2), cela suppose de laisser cette variété s'exprimer ;

- possible, car le développement prévisible des artefacts à venir est un développement en *réseau*, induisant un travail collaboratif au sein de la classe, supposant une certaine autonomie laissée aux élèves Ainsi, dès la rentrée de septembre 2005, doit être expérimenté dans 4 classes de l'académie d'Orléans-Tours (partenariat IREM-IUFM-rectorat-INRP) un nouveau dispositif (Figure 17), TI-Navigator, développé par Texas Instruments. Les calculatrices peuvent être reliées par 4 (au plus) à un hub, qui assure la connexion avec l'ordinateur du professeur, qui dispose de tous les écrans des élèves et peut décider de projeter le travail de l'un d'entre eux sur un écran collectif. On peut l'imaginer, ce dispositif à la fois induit de nouveaux modes de travail dans la classe et ouvre de nouvelles possibilités.

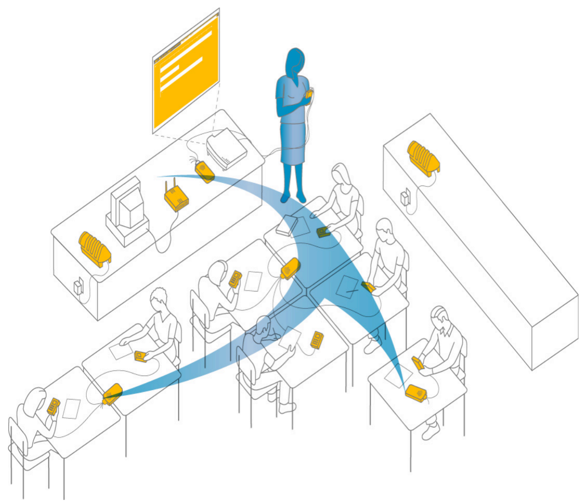


Figure 17. TI-Navigator, de nouvelles configurations didactiques possibles

Les orchestrations basées sur ce type de configurations didactiques donnent de nouvelles opportunités pour favoriser *la participation des élèves à l'enseignement* (Mercier 1998). Cependant, il n'y a pas nécessairement *actualisation* de ces possibilités, comme le montre une expérimentation réalisée auprès de plusieurs professeurs stagiaires (Bernard 1996) : un prêt d'un dispositif de rétroprojection a été proposé, accompagné de la suggestion de tester la configuration d'élève-sherpa (Figure 16). Le bilan fait apparaître que ces professeurs stagiaires, la plupart du temps, ont estimé préférable de manipuler *eux-mêmes* la calculatrice projetée. Favoriser la participation des élèves à l'enseignement ne repose pas seulement sur un dispositif matériel, le ressort essentiel en est une *intention* didactique et une *possibilité de mise en œuvre* : laisser une grande part d'initiative aux élèves suppose un haut degré de *maîtrise du milieu* d'apprentissage, de ses possibilités d'évolution, de l'environnement technologique, de ses contraintes et de ses possibilités, cela fait beaucoup pour un professeur stagiaire… et pour un professeur chevronné aussi !

D. Concevoir des ressources pédagogiques

Nous avons vu la nécessité de concevoir de nouvelles situations mathématiques et de décrire les conditions de leur mise en œuvre, ce qui suppose un scénario, incluant une orchestration instrumentale. Sans doute faut-il prévoir, en fonction des communautés auxquelles on s'adresse, d'autres documents (par exemple des fiches techniques, précisant quelques difficultés prévisibles liées aux artefacts disponibles, ou un document incluant des éléments de formation complémentaires s'il s'agit de professeurs débutants). Finalement se dessinent les contours de *ressources pédagogiques* dépassant largement le seul énoncé d'un problème, classiquement conçu à destination des élèves. Mais il semble alors que l'on a remplacé une difficulté pour les enseignants (intégrer des artefacts complexes dans sa classe) par une autre (concevoir des ressources pédagogiques complexes pour assurer cette intégration). À cette objection, on peut proposer des réponses à plusieurs niveaux :

- il y a bien sûr plusieurs stades de réalisation d'une situation, d'un scénario, d'une orchestration, plus ou moins achevés ;
- la réalisation de ressources numériques, comme la réalisation d'ouvrages scolaires, dépasse la responsabilité des seuls enseignants : on peut envisager la réunion d'équipes pluridisciplinaires réunissant des mathématiciens, des didacticiens, des informaticiens, des enseignants de terrain pour concevoir, expérimenter et réviser des ressources pédagogiques intégrant les TICE ;
- enfin on peut envisager un cadre de *mutualisation*. Cette mutualisation peut être *globale*, à l'échelle de l'institution elle-même ou de vastes communautés d'utilisateurs, ou *locale*, à l'échelle de communautés plus réduites partageant une expérience ou des objectifs communs. Au niveau local comme global, dès lors que l'on veut développer une *banque* partagée de ressources pédagogiques numériques, des questions vont se poser pour leur *indexation* (Figure 18), leur *homogénéisation* (pour en faciliter l'utilisation par d'autres que ceux qui les ont conçues) et leur *évolution* (permettant leur enrichissement par intégration de l'expérience des nouveaux utilisateurs).

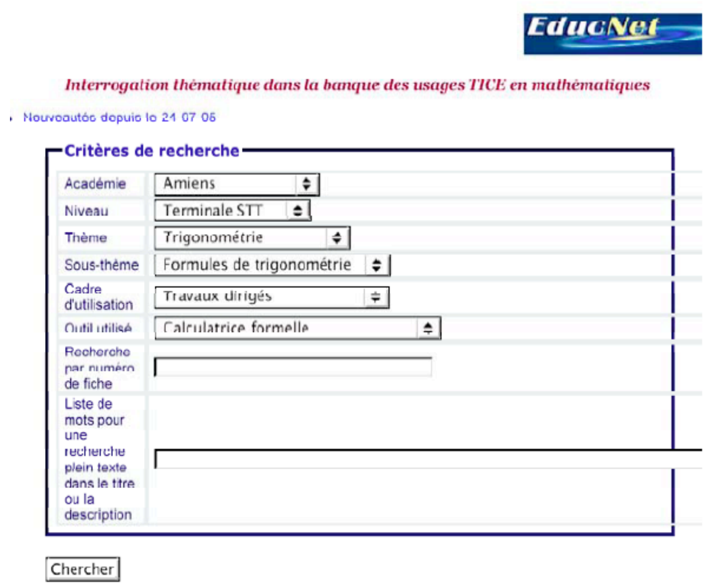


Figure 18. Indexation et moteur de recherche de la base EducNet du MEN
(http://bd.educnet.education.fr/urtic/maths/index.php)

Ces questions de réutilisation des ressources partagées dont très complexes à un niveau global, elles ont trouvé des premiers éléments de réponse au niveau local, et c'est sur le bilan de ces dispositifs expérimentaux prometteurs que je voudrais achever cette conférence.

[FIN DE LA DEUXIÈME PARTIE]

[POUR LIRE L'ARTICLE COMPLET, VOIR : http://www.ac-clermont.fr/disciplines/fileadmin/user_upload/Mathematiques/pages/site_math_universite/CD-UE/Texte_16.doc]

Ouvrages cités

ALAIN, *Propos sur l'éducation,* Paris, PUF, 1932

ARTIGUE M., « Le logiciel Derive comme révélateur de phénomènes didactiques liés à l'utilisation d'environnements informatiques pour l'apprentissage » in *Educational Studies in Mathematics,* 33/2, 1997, pages 133-169

BALACHEFF N., « Didactique et intelligence artificielle » in *Recherches en Didactique des Mathématiques,* 14/1-2, 1994, pages 9-42

BERNARD R., FAURE C., NOGUES M. & TROUCHE L., *L'intégration des outils de calcul dans la formation initiale des maîtres*, Montpellier, IREM, Université Montpellier II, 1996

BERNARD R., FAURE C., NOGUES M., NOUAZE Y. & TROUCHE L., *Pour une prise en compte des calculatrices symboliques en lycée*, Montpellier, IREM, Université Montpellier II, 1999

BORWEIN J., BORWEIN P., GIRGENSOHN R. & PARNES S., « Making sense of experimental mathematics » in *The Mathematical Intelligencer,* 18/4, 1996, pages 12-8

BRIL S., « Apprentissage et contexte » in *Intellectica,* 35, 2002, pages 251-268

BROUSSEAU G., *La théorie des situations didactiques,* Grenoble, La Pensée sauvage, 1998

CAPPONI B., « Scénario d'initiation à l'environnement de Cabri-géomètre pour des élèves de lycée avec le module Geometry de la TI 92 », in Guin D. (Ed.), *Colloque Francophone Européen Calculatrices symboliques et géométriques dans l'enseignement des mathématiques*, Montpellier, IREM, Université Montpellier II, 1998.

CHEVALLARD Y., « Intégration et viabilité des objets informatiques : le problème de l'ingénierie didactique » in Cornu B. (Ed.) *L'ordinateur pour enseigner les mathématiques,* 1992, pages 33-57

CHEVALLARD Y., « Les outils sémiotiques du travail mathématique » in *Petit x,* n° 42, 1996, pages 33-57

COMBES M.-C. & NOGUES M., « Formation à distance des professeurs de mathématiques, vers de nouvelles pratiques professionnelles » in *Intégration des TIC et formation à distance dans un espace transfrontalier : l'exemple de la Catalogne et du Languedoc-Roussillon,* Barcelone, UOC, 2005

CREM, « Informatique et enseignement des mathématiques », in L'enseignement des sciences mathématiques (dir. Kahane J.-P.), Paris, Odile Jacob & CNDP, 2002

CREM, « Formation des maîtres et recommandations associées », http://smf.emath.fr/Enseignement/CommissionKahane/, 2003

DESCO, *Documents d'accompagnement des nouveaux programmes de l'école primaire,* Paris, MEN, 2002

DUVAL R., « Quel cognitif retenir en didactique des mathématiques » in *Recherches en Didactique des Mathématiques,* 16/3, 1996, pages 348-382

GUIN D. & TROUCHE L. (Eds.), *Calculatrices graphiques, transformer un outil en un instrument du travail mathématique : un problème didactique,* Grenoble, La Pensée sauvage, 2002

GUIN D., JOAB M. & TROUCHE L *SFoDEM (Suivi de Formation à Distance pour les Enseignants de Mathématiques), bilan de la phase expérimentale*, Montpellier, IREM, Université Montpellier II, 2003

GUIN D. & TROUCHE L., « Intégration des TICE : concevoir, expérimenter et mutualiser des ressources pédagogiques » in *Repères-IREM*, 55, 2004, pages 81-100

HEBERT E., *Instruments scientifiques à travers l'histoire,* Paris, Ellipses, 2004

LAGRANGE J.-B., ARTIGUE M., LABORDE C. & TROUCHE L., « Technology and Mathematics Education : a Multidimensional Study of the Evolution of Research and Innovation » in A. Bishop, M.A. Clements, C. Keitel, J. Kilpatrick & F.K.S. Leung (Eds.), *Second International Handbook of Mathematics Education,* Dordrecht , Kluwer Academic Publishers, 2003, pages 239-271

LAVOIE P., *Contribution à une histoire des mathématiques scolaires au Québec : l'arithmétique dans les écoles primaires (1800-1920),* Québec, Faculté des Sciences de l'Éducation, 1994

MASCHERONI L., *Géométrie du compas,* 1798, Paris, Librairie scientifique et technique Albert Blanchard, 1980

MERCIER A., « La participation des élèves à l'enseignement » in *Recherches en Didactique des Mathématiques,* 18/3, 1998, pages 279-310

PROUST C., « La multiplication babylonienne : la part non écrite du calcul » in *Revue d'Histoire des Mathématiques,* n°6, 2000, pages 293-303

RABARDEL P., *Les hommes et les technologies, approche cognitive des instruments contemporains,* Paris, Armand Colin, 1995

RODITI E., *Le tableau noir : un outil pour la classe de mathématiques,* Cahiers de DIDIREM 30, 1997

SCHÄRLIG A., *Compter avec des jetons,* Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romanes, 2003

SENSEVY G., MERCIER A. & SCHUBER-LEONI M.L., « Vers un modèle didactique de l'action du professeur. A propos de la course à 20 » in *Recherches en Didactique des Mathématiques,* 20/3, 2000, pages 263-304

SFEZ L., *Technique et idéologie (un enjeu de pouvoir),* Paris, Seuil, 2002

TROUCHE L., « E pur si muove » in *Repères-IREM,* n°20, 1995, pages 16-28

TROUCHE L., *Expérimenter et prouver, faire des mathématiques avec des calculatrices symboliques, 38 variations sur un thème imposé,* Montpellier, IREM, Université Montpellier II, 1998

TROUCHE L., « Construction et conduite des instruments dans les apprentissages mathématiques : nécessité des orchestrations » in *Recherches en Didactique des Mathématiques,* 25/1, 2005, pages 91-138

VERGNAUD G., « La théorie des champs conceptuels » in *Recherches en Didactique des Mathématiques,* 10/2-3, 1990, pages 133-170

VYGOTSKI L.S., *Pensée et langage,* 1934, Paris, La dispute, 2002

WENGER E., *Communities of practice*, New York, Cambridge University Press, 1998