

# Poutres et maquettes didactiques sensorielles

YVES BRACCINI, ROBERT GOURHANT<sup>[1]</sup>

Nous vous avons déjà présenté il y a quelque temps, dans les numéros 134 et 137, les « maquettes didactiques sensorielles », permettant aux élèves d'éprouver physiquement les liaisons mécaniques. Depuis, leurs concepteurs ont poursuivi leur réflexion et appliqué leur démarche à la résistance des matériaux (RdM). Dans cette première partie, ils présentent leur approche didactique s'appuyant sur la sollicitation manuelle de « poutres sensorielles » pour vérifier les hypothèses de la RdM, identifier les sollicitations et les déformations associées. Une approche qu'ils ont mise en œuvre avec succès dans leurs classes pour introduire les notions nouvelles ou pendant la synthèse à la fin d'un cycle de TP.

## La démarche sensorielle pour modéliser des actions mécaniques

Pour modéliser une action mécanique transmise par une liaison, nous partons des effets produits par cette liaison en en reconstituant le type au moyen d'une maquette didactique munie de poignées placée à côté du mécanisme dans la même position spatiale et équipée d'un repère local  $(C, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ . (Le matériel et le dossier pédagogique sont diffusés par Crea Technologie, voir l'encadré « Pour se les procurer ».)

## Le principe de la manipulation

Un élève moteur, représentant le système extérieur, sollicite manuellement la partie 6 de la liaison figurée en 1, et un élève récepteur, représentant le système isolé, à partir de ses perceptions sur la partie 1, dit s'il s'agit d'une force (tendance à la translation selon une direction) ou d'un moment (tendance à la rotation autour d'un axe). Il peut aussi caractériser cette action mécanique en construisant le modèle vectoriel de cette action : Selon quel axe son support est-il porté,  $(C, \vec{x})$ ,

[1] Respectivement : professeur de construction mécanique au lycée Hippolyte-Fontaine de Dijon (21) ; formateur associé à l'IUFM de Créteil (94).

## Mots-clés

équipement didactique, lycée professionnel, lycée technologique, matériaux, postbac, prébac, résistance des matériaux, travaux pratiques

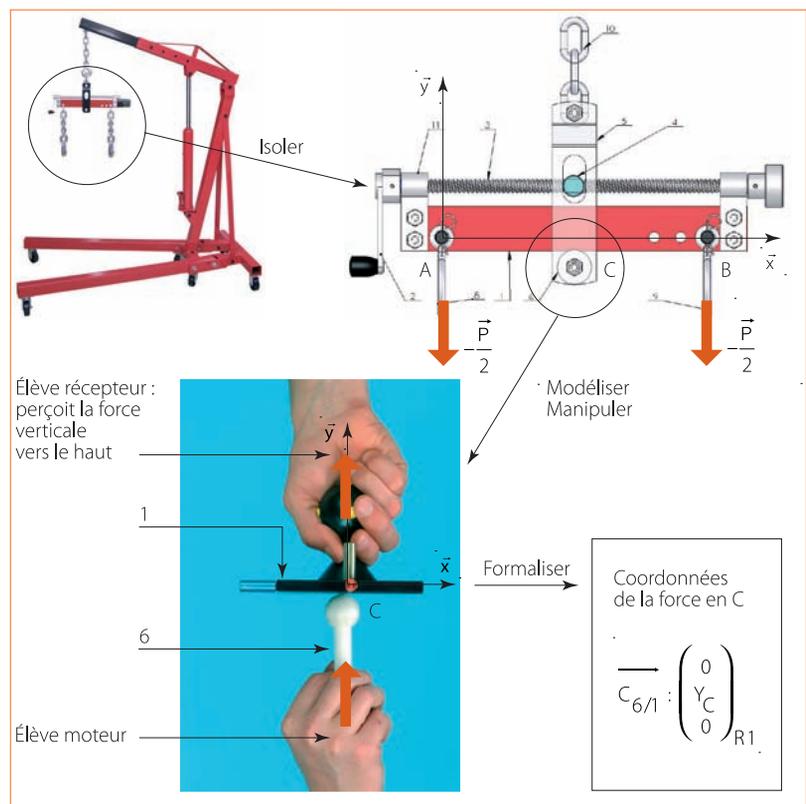
$(C, \vec{y})$  ou  $(C, \vec{z})$  ? Quel est son sens, vers le haut ou vers le bas ? Son intensité est-elle faible ou forte ?

Cette étape correspond à l'isolement de la poutre horizontale 1 du balancier de levage de moteur d'automobile de poids  $\vec{P}$  1. La manipulation

des maquettes peut se faire pour la liaison sphère-plan en C et pour les deux liaisons pivots en A et en B sollicitées par des forces verticales. Compte tenu des hypothèses simplificatrices, l'élève prend conscience que la poutre est soumise à un système de trois forces parallèles. La modélisation des actions mécaniques extérieures sur cette dernière est plus concrète, le risque d'erreur est donc limité, et la résolution du problème de statique – préalable à l'étude de résistance des matériaux – a du sens.

## Les difficultés spécifiques à la RdM

Face aux difficultés d'apprentissage de la construction mécanique, nous adoptons un modèle d'apprentissage



1 La modélisation d'une liaison sphère-plan et de l'action mécanique associée

# (première partie)

« constructiviste » qui nous conduit à prendre en compte les processus cognitifs des élèves. Nous avons observé chez ces derniers des difficultés à :

1 modéliser les actions mécaniques extérieures et faire le lien avec les déformations pour identifier les sollicitations ;

2 matérialiser les hypothèses de la RdM quant à la nature des forces (concentrées, réparties), la nature des appuis (simples, encastrés...), la déformation des sections droites (Bernoulli, Saint-Venant) ;

3 appréhender le caractère abstrait – car difficilement observable – des grandeurs spécifiques à ce domaine (déformations linéaires, angulaires, contraintes...).

Compte tenu de ces difficultés, nous proposons à nos élèves, comme pour la modélisation des liaisons mécaniques, une mobilisation de la dimension sensorielle pour donner un contenu à ces concepts abstraits et du sens à l'étude de la RdM. Les maquettes aident ceux qui ont une dominante kinesthésique dans les apprentissages à passer du concret à l'abstrait et ceux qui ont de bonnes capacités d'abstraction à interpréter les résultats.

## La modélisation des actions mécaniques extérieures et l'identification des sollicitations

Nous avons déjà rencontré cette difficulté en statique. Certains élèves n'arrivent pas à se représenter les effets physiques d'une action selon sa nature (force ou moment) et selon sa direction dans l'espace (force normale ou tangentielle au plan de contact, par exemple).

En résistance des matériaux, cette difficulté est accentuée par le fait que

ces directions privilégiées sont souvent définies par rapport à des éléments immatériels (ligne moyenne, sections droites, par exemple). La géométrie externe de la poutre, sa morphologie ne permet pas de déduire automatiquement des caractéristiques qui demeurent abstraites et spécifiques au domaine de la RdM. A-t-on affaire à une force normale ou à une force tangentielle, à un moment de torsion ou de flexion ? Seule la position relative du support de l'action mécanique par rapport aux sections droites de la poutre peut aider à répondre à cette question.

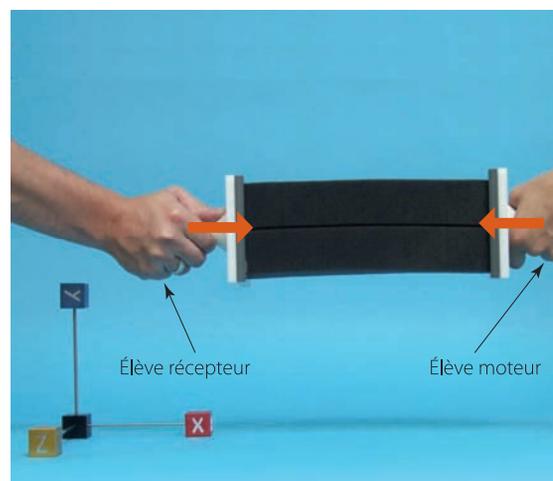
Pour lever la difficulté, nous demandons aux élèves de solliciter manuellement des poutres réelles en mousse équipées de poignées sensorielles sphériques sur lesquelles des picots matérialisent les trois directions de l'espace.

Cette manipulation est reliée à la représentation que nous avons de notre corps, car le placement de ce dernier par rapport aux éléments caractéristiques de la poutre est une aide précieuse pour identifier la nature des actions mécaniques la sollicitant.

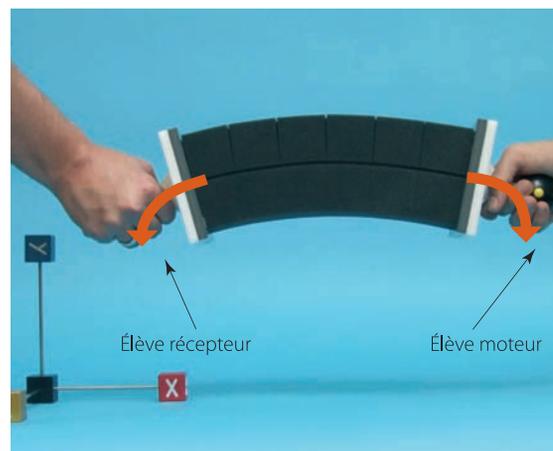
Nous pouvons modéliser simplement, par exemple :

- deux forces normales (aux sections droites) et opposées, dans le prolongement des avant-bras, c'est-à-dire selon  $(O, \vec{x})$ . À partir de là, il est possible d'identifier la sollicitation de compression et d'observer la déformation de la poutre (raccourcissement) 2 ;

- deux moments tangentiels (aux sections droites), autour d'axes perpendiculaires à l'avant-bras, c'est-à-dire deux moments de flexion opposés autour de  $(O, \vec{z})$ . On peut donc identifier la sollicitation de flexion et observer la courbure de la poutre 3.

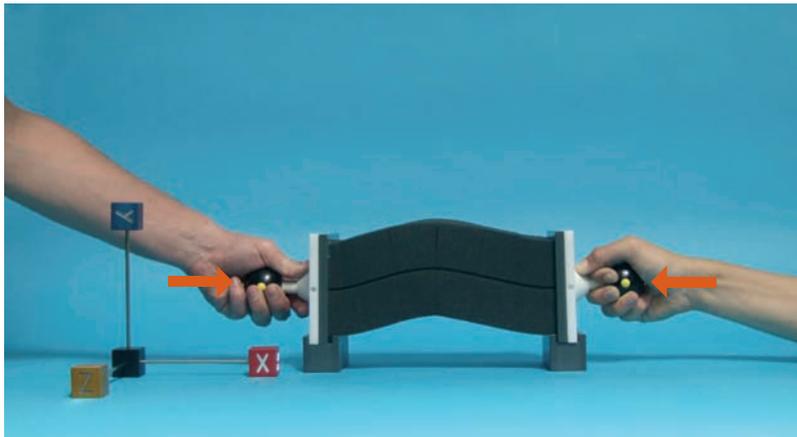


2 La compression (forces opposées)



3 La flexion avec deux moments opposés

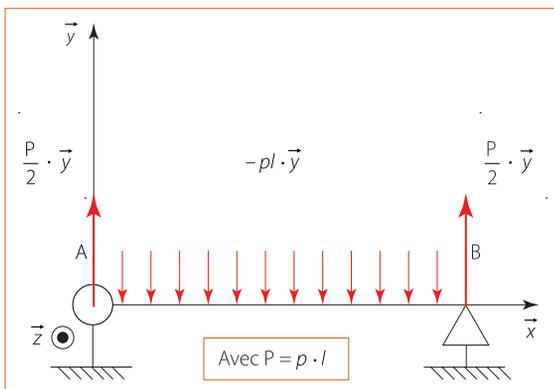
Une fois observées, les sollicitations sont nommées en situation, soit par l'enseignant soit par les élèves. Ainsi, dans l'action, ils font facilement le lien entre les actions mécaniques, matérialisées par les actions des mains selon des directions privilégiées, les déformations visibles et la nature de la sollicitation. L'observation précède toujours la formalisation. Les forces et les déformations sont associées dès le début pour définir les sollicitations.



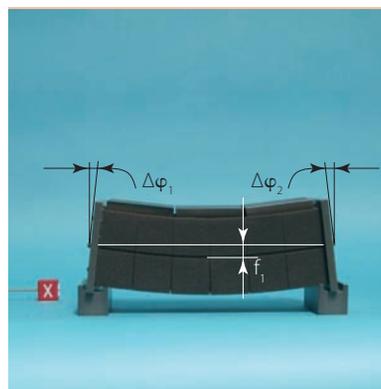
4 Le flambage avec deux appuis encastrés aux deux extrémités



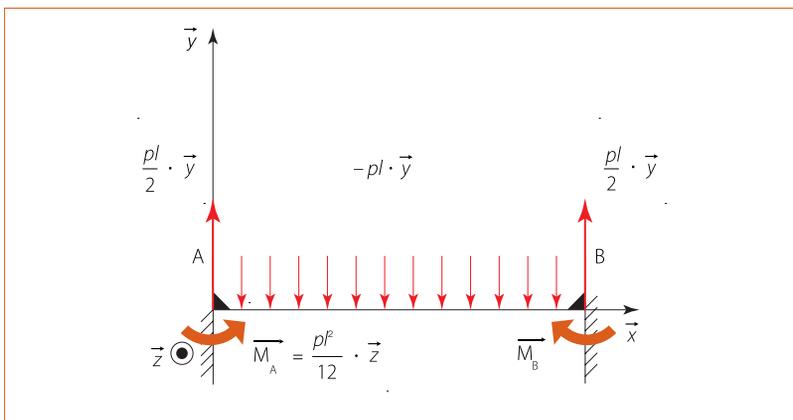
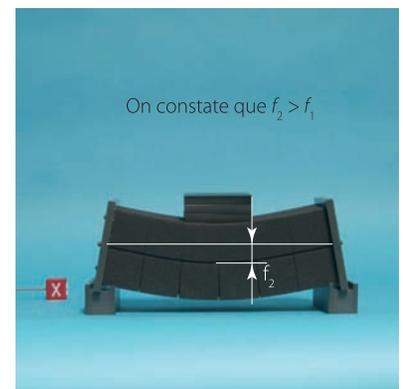
5 L'enrouleur de toile



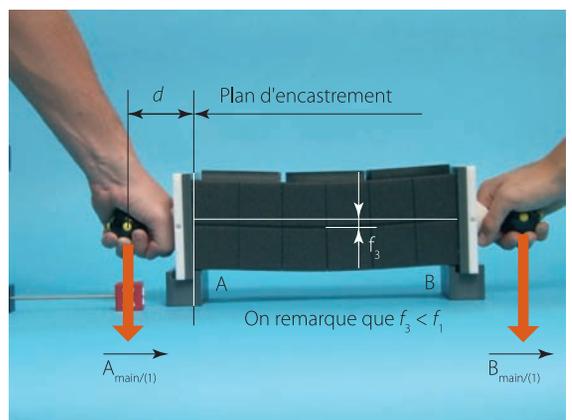
6 La modélisation 1 du tube porteur



7 Deux systèmes non équivalents physiquement



8 La modélisation 2 du tube porteur



9 L'expérience avec deux appuis encastrés

Nous utilisons aussi ces manipulations pour produire des phénomènes qui surprennent et provoquent un désir de comprendre. Ainsi, en soumettant une poutre à deux forces opposées selon la ligne moyenne, nous provoquons de la compression, mais, une fois la charge critique dépassée, la sollicitation se transforme en flambage 4. Les questions fusent : Pourquoi ce phénomène ? Les forces sont-elles vraiment restées colinéaires ?...

### La matérialisation des hypothèses de la RdM

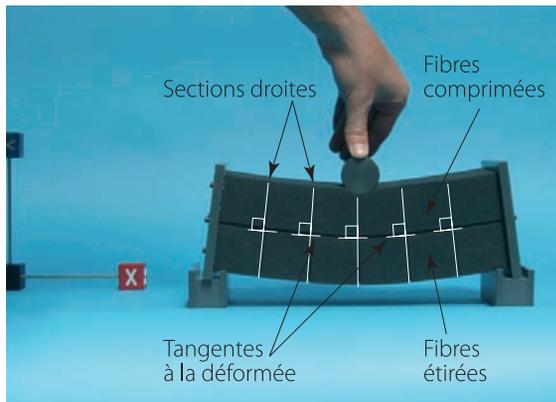
#### La nature des forces et leur influence

Les forces concentrées ou réparties ne provoquent pas les mêmes déformations, même si elles ont les mêmes résultantes. Alors qu'elles sont vectoriellement équivalentes, physiquement elles ne le sont pas. On dit qu'en RdM la structure des efforts est liée,

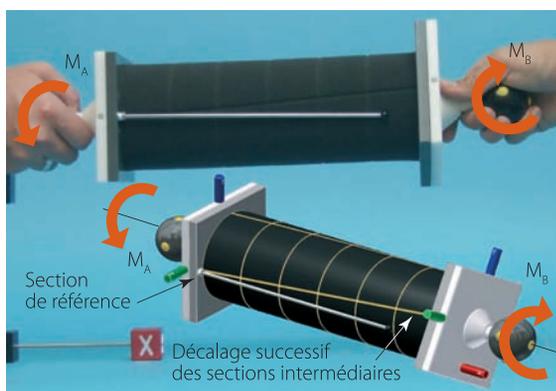
les forces sont donc modélisées par des « pointeurs ».

Cette règle très abstraite peut être redécouverte par l'élève à partir d'une manipulation simple.

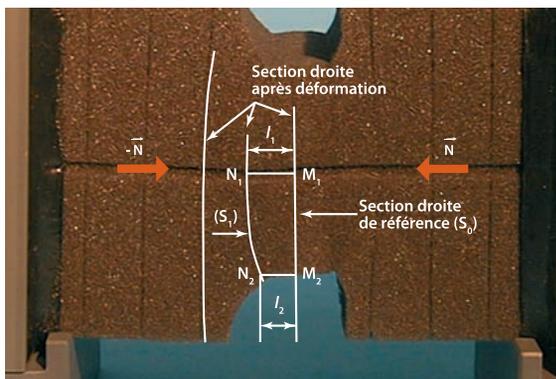
Sur l'enrouleur d'une toile de protection de piscine 5, le poids de la toile est modélisé par une charge répartie qui fait fléchir le tube support que l'on veut dimensionner et par des liaisons en A et en B qui permettent la libre rotation des sections 6.



**10** Le déplacement des sections droites sur une poutre parfaite



**11** L'exemple de la torsion



**12** La déformation des sections dans une poutre non parfaite

Pour simplifier les calculs, peut-on remplacer cette charge par une charge concentrée  $P$  appliquée au milieu, résultante des charges réparties, comme on le fait en statique avec les solides indéformables pour calculer les actions aux appuis ?

En faisant l'expérience avec des masses identiques disposées différemment **7**, l'élève constate que les flèches sont différentes dans les deux cas, et que les deux systèmes ne sont

pas physiquement équivalents. On doit donc conserver les charges réparties dans les calculs.

### La nature des appuis et leur influence

Une autre notion n'est pas évidente pour les élèves, c'est celle de la modélisation des appuis. Quel est le comportement de la poutre avec des appuis simples qui permettent la libre rotation  $\Delta\varphi_1$  et  $\Delta\varphi_2$  des sections droites autour de  $(A, \vec{z})$  et  $(B, \vec{z})$  (rotulage) **7** et avec des appuis encastrés dont les deux moments d'encastrement  $M_A$  et  $M_B$  suppriment cette rotation **8** ?

Sur l'exemple précédent, quel serait l'effet du remplacement des appuis simples (modélisation 1 **6**) par des appuis encastrés (modélisation 2 **8**) sur le fléchissement du tube porteur ?

On demande à l'élève de faire l'expérience **9** avec le même chargement que précédemment, mais en supprimant manuellement la rotation des sections extrêmes pour modéliser des appuis encastrés. Il crée ainsi deux moments d'encastrement et va en comprendre le sens.

On a :

$$M_A = \|\vec{A}_{\text{main}(1)}\| \cdot d$$

avec  $M_B = -M_A$

À la suite de cette manipulation, l'élève constate que la flèche  $f_3$  est plus faible que la flèche  $f_1$ .

Il peut alors conclure que le système hyperstatique comportant deux appuis encastrés de la modélisation 2 **8** est plus rigide que le système isostatique de la modélisation 1 **6**.

Dans certains cas, cela peut être une réponse aux exigences du cahier des charges.

### Le déplacement des sections droites

L'hypothèse de Bernoulli affirme que les sections droites et planes avant déformation restent droites et planes après déformation.

Cette hypothèse peut être vérifiée simplement par l'expérience avec une poutre en mousse sur laquelle les sections droites et la ligne médiane sont matérialisées par des traits **10**.

En chargeant la poutre, on constate que les sections restent perpendiculaires aux tangentes à la déformée ; l'hypothèse est donc vérifiée.

L'expérience peut être faite en traction, compression, flexion, avec un solide parfait. Ainsi l'élève peut en déduire où sont les zones tendues et les zones comprimées, et ultérieurement, dans une autre séquence, une répartition des contraintes.

Pour la torsion, on constate que l'hypothèse est vérifiée avec une poutre de section circulaire **11**, mais non avec une section prismatique : on observerait un voilage de sections dans les angles.

De même, s'il y a un accident de forme, l'élève peut observer que les sections s'incurvent au voisinage de l'accident, ce qui est à l'origine du phénomène de concentration de contraintes dans les angles **12** :

$$N_2 M_2 < N_1 M_1$$

Les poutres en mousse sont donc très utiles pour vérifier l'hypothèse de Bernoulli et pour préciser les limites de sa validité.

### Le caractère abstrait des grandeurs physiques de la RdM

Dans les mécanismes ou les ouvrages d'art, les solides en acier – hormis les ressorts –, en béton ou en bois soumis à des charges présentent de faibles déformations. Ces dernières sont invisibles à l'œil nu lorsque l'on reste dans le domaine élastique. Bien sûr, elles peuvent être mises en évidence grâce à des instrumentations (jauges de contraintes, comparateurs...), mais le temps imparti dans l'année pour traiter le programme ne permet pas toujours leur mise en œuvre, longue et délicate. Dans la plupart des cas, ces grandeurs sont définies de façon abstraite, à partir de schémas explicatifs que les élèves assimilent plus ou moins et mémorisent difficilement.

Les poutres en mousse, sur lesquelles des lignes médianes, des sections droites et des génératrices ont été matérialisées par des gravures, permettent de rendre visibles ces déformations et d'en sentir les effets kinesthésiques.

À l'aide d'une tige rigide liée à une section de référence, nous pouvons observer en direct les déformations de la matière et des sections droites, et mesurer les déplacements des flèches et les longueurs des arcs 12.

Dans le cas de la torsion, par exemple, nous pouvons montrer que la rotation des sections se fait autour de l'axe longitudinal, que les sections droites tournent d'un angle  $\alpha$  qui devient de plus en plus grand lorsque l'on s'éloigne de la section de référence. On peut aussi calculer le rapport  $\alpha/l$ , définir concrètement l'angle unitaire de torsion et constater qu'il reste constant.

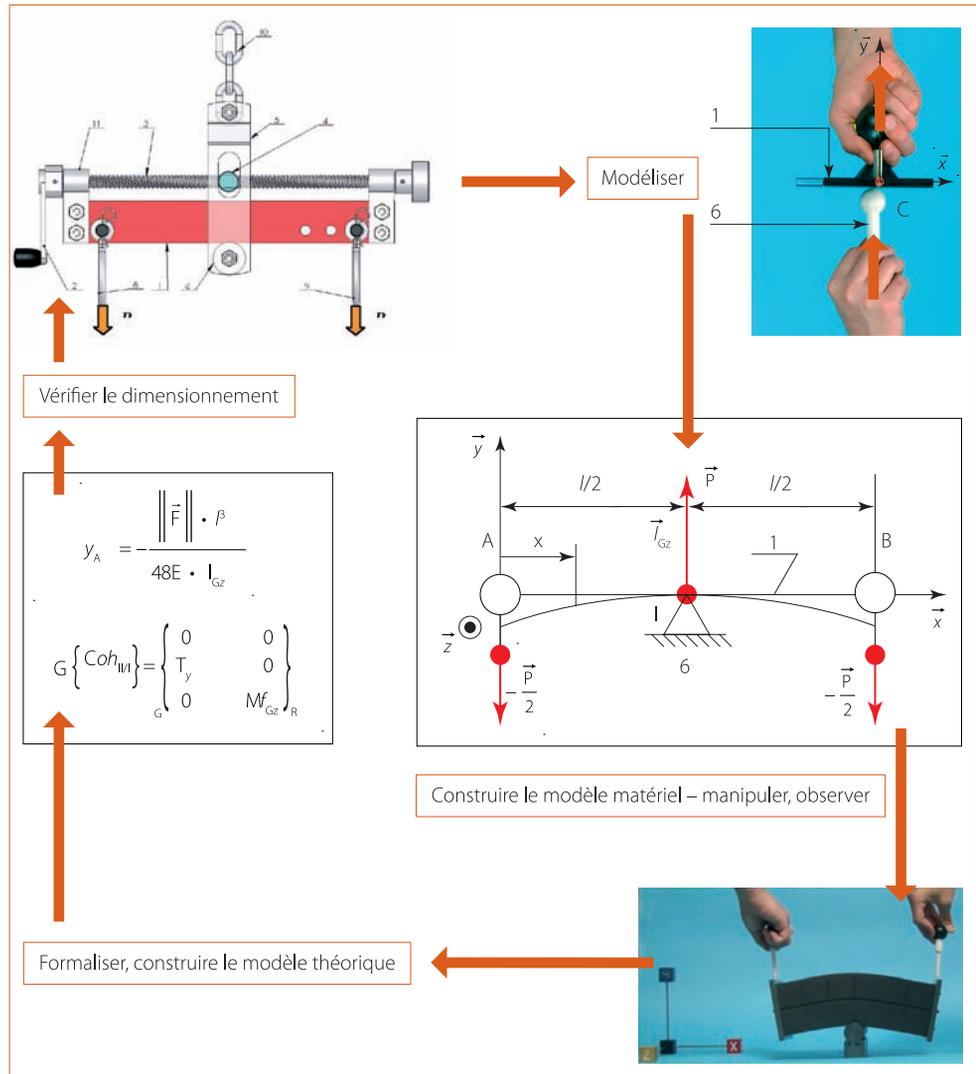
**L'approche didactique sensorielle globale**

Toutes ces expériences sont faites en relation avec un problème technique à résoudre afin que cette démarche ait du sens. Nous partons toujours du réel pour aller vers le modèle et y revenir 13.

En résumé et dans un premier temps, nous modélisons les liaisons et les charges à l'aide des maquettes didactiques sensorielles de liaisons mécaniques, puis nous construisons une expérience pour observer le comportement sous charge et formaliser ces observations.

En s'appuyant sur le modèle ainsi matérialisé par les maquettes, l'élève peut constater que les hypothèses sont vérifiées, observer les flèches ainsi que les déformations aux appuis, identifier les sollicitations à partir des actions mécaniques extérieures et les déformations produites. Il pourra ensuite valider certains choix technologiques et vérifier si les résultats sont conformes à ce qui était attendu.

En conclusion, cette démarche inductive se fait dans l'action, sans mise en œuvre de protocoles expérimentaux complexes qui pourraient faire écran à ce que l'on recherche. C'est un espace intermédiaire qui permet de construire les savoirs nouveaux, qui pourront être réinvestis dans d'autres situations plus complexes, nécessitant une quantification par une simulation numérique, par exemple. Il



13 Le schéma de l'approche didactique

n'y a pas non plus de phase préalable de compréhension longue, précédant l'application, car, à chaque étape de l'élaboration cognitive, l'action et les sens sont sollicités et privilégiés.

Comme la plupart des manipulations se font entre un élève moteur et un élève récepteur – ou entre un élève et l'enseignant –, cela renforce les interactions au sein de la classe et la motivation. Cette démarche qui s'appuie sur une expérience liée au corps, à une parole qui organise l'action, qui nomme ce qui a été observé, perçu, qui aide à élaborer une pensée humanise l'apprentissage. Elle permet de passer du monde des choses au monde des mots et des représentations. Les résultats de l'apprentissage s'en trouvent consolidés tant

au niveau des compétences liées aux savoirs et aux savoir-faire qu'au niveau des attitudes.

Nous verrons prochainement comment utiliser l'approche sensorielle pour définir le torseur des forces de cohésion, identifier les paramètres qui influent sur les déformations (flèches) et prévoir une répartition des contraintes dans une section droite. ■

► Pour se les procurer

Crea Technologie  
 17, rue des Tilleuls - BP 55  
 78960 Voisins-le-Bretonneux  
 Tél. : 01 30 57 47 00 Fax : 01 30 57 47 47  
[info@crea-technologie.com](mailto:info@crea-technologie.com)  
[www.crea-technologie.com](http://www.crea-technologie.com)

# Sous le regard des satellites

## Des kits pédagogiques clés en main



### Version géographie

Kit pédagogique : 7 dossiers + 1 DVD

- Les satellites d'observation de la Terre
- Le globe terrestre vu de l'espace
- Les hommes sur la Terre
- L'Afrique et la diversité des milieux
- L'Asie et la riziculture
- L'Europe, un continent développé
- Les inondations sous surveillance

Réf. 755A3082

### Version SVT-sciences physiques

Kit pédagogique : 6 dossiers + 1 DVD

- Les satellites d'observation de la Terre
- Les espèces vivantes et leurs milieux
- L'eau sur la Terre
- Les volcans : l'exemple de l'Etna
- Les inondations sous surveillance
- Les images satellites et leurs couleurs

Réf. 755A3083



Dans chaque dossier :

- > 16 documents thématiques identiques pour distribution aux élèves par binôme
- > Un questionnaire pour les élèves
- > Un feuillet d'accompagnement réservé aux professeurs

Dans le DVD :

- > Toutes les images satellites contenues dans les dossiers

[www.sceren.com](http://www.sceren.com)

Également disponibles :

- À la Librairie de l'éducation Paris / Métro Mabillon
  - Dans les librairies des CRDP/CDDP
- [www.sceren.fr/cndp\\_reseau/](http://www.sceren.fr/cndp_reseau/)



SERVICES CULTURE ÉDITIONS  
RESSOURCES POUR  
L'ÉDUCATION NATIONALE  
[CNDP - CRDP]



CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES