

Cours Journées Jeunes Chercheurs

J•FIG 2018

13 Novembre 2018 - Poitiers

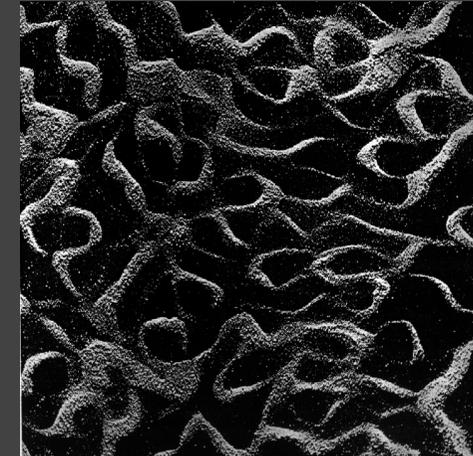
**La modélisation physique pour la  
synthèse du mouvement visuel :  
Pourquoi ? Comment ?  
Théorie et exemples**

Annie Luciani - ACROE

[Annie.Luciani@grenoble-inp.fr](mailto:Annie.Luciani@grenoble-inp.fr)



# IMAGE



## Plusieurs attributs

### Des attributs de formes

Formes des objets, des personnages, des phénomènes  
Etc.

### Des attributs cinétiques

Ralentis, accélérations, dynamiques des rebonds, des déformations  
etc.

### Des attributs optiques

Ombrages  
Couleurs  
Transparence  
Etc.



Science de l'espace  
**GEOMETRIE**  
 $f(x,y,z)=0$



Science du mouvement  
**PHYSIQUE**  
 $X_i=A_i(t)$



Science de la lumière  
**OPTIQUE**  
 $\sin(i) = n\sin(r)+\text{Maxwell}$

**IMAGE de synthèse : MULTISCIENCES**



# IMAGE



## Des attributs de formes

Formes des objets, des personnages, des phénomènes  
Etc.



Science de l'espace  
**GEOMETRIE**  
 $f(x,y,z)=0$

## Des attributs cinétiques

Ralentis, accélérations, dynamiques des rebonds, des déformations  
etc.



Science du mouvement  
**PHYSIQUE**  
 $X_i=A_i(t)$

## Des attributs optiques

Ombrages  
Couleurs  
Transparence  
Etc.



Science de la lumière  
**OPTIQUE**  
 $\sin(i) = n\sin(r) + \text{Maxwell}$

## IMAGE de synthèse : MULTISCIENCES

Donc, il faut combiner les trois,  
et  
il faut savoir faire – un savoir-faire - pour chacune

## Des attributs cinétiques

Ralentis, accélérations,  
dynamiques des rebonds,  
des déformations, etc.

## Qu'est ce que le mouvement ?

Quelque chose (un attribut) qui change au cours du temps, qui évolue?

Attribut : une position, une température, le nombre de personnes qui ont la grippe .....  $X = f(t) \dots X(t)$

*Oui, mais ce n'est pas suffisant :*

Car si ça évolue sans changer, par exemple, une vitesse constante, on peut s'arrêter là. Circulez, il n'y a rien à voir.

Il faut que la vitesse change (vitesse = variation de l'attribut au cours du temps) :

.....  $V = g(t) \dots V(t)$

Donc, il faut qu'il y ait une accélération (variation de la variation de l'attribut au cours du temps)

Mais imaginons une accélération constante ... hummm !!! Difficile

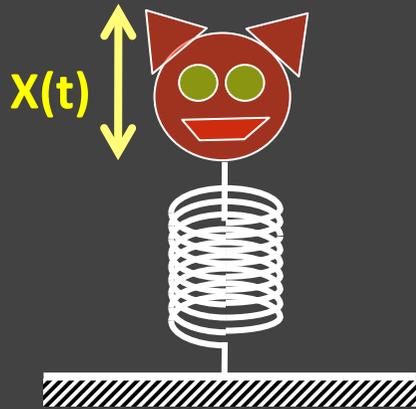
Par conséquent, il faut que l'accélération évolue

.....  $A = h(t) \dots A(t)$

On va s'arrêter là, et si j'ai le temps, je vous montrerai que ça suffit

## Des attributs cinétiques

Ralentis, accélérations, dynamiques des rebonds, des déformations, etc.



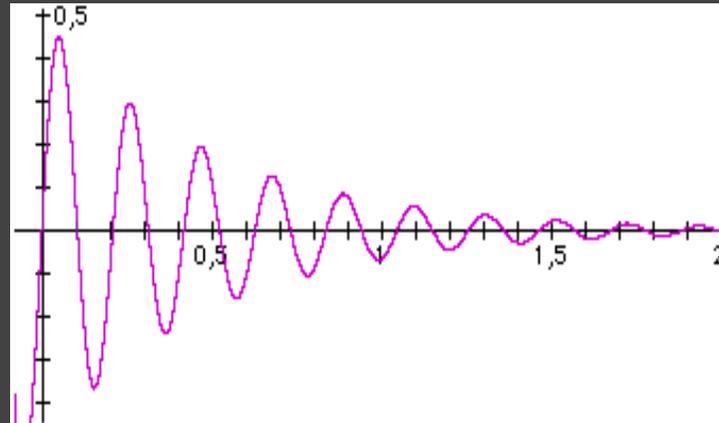
Evolution de la position ->  $X(t)$

Evolution de la vitesse ->  $V(t)$

Evolution de l'accélération ->  $A(t)$

## Qu'est ce que le mouvement ?

Quelque chose (un attribut) qui change au cours du temps, qui évolue?



Question :

Est ce que vous êtes capable de le **voir** en regardant votre snoopy ?

Il se peut que non .... Mais supposons que oui.

Est ce que vous êtes capables de voir que ces différentes évolutions sont corrélées ?

Il se peut que non .... Mais supposons que oui.

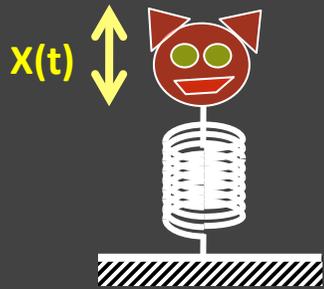
Est ce que vous êtes capables de déduire de votre observation une écriture de cette corrélation ? .... Il se peut que non .... Supposons que oui.

## Des attributs cinétiques

Ralentis, accélérations,  
dynamiques des rebonds,  
des déformations, etc.

## Qu'est ce que le mouvement ?

Quelque chose (un attribut) qui change au cours du temps, qui évolue?



Est ce que vous êtes capables de déduire de votre observation une écriture de cette corrélation ? ...

Il se peut que non .... Supposons que oui.

Cette formulation est une équation différentielle du 2<sup>nd</sup> ordre.

### La question n°1 est :

Est ce que vous avez pu écrire cette équation différentielle du 2<sup>nd</sup> ordre **seulement** en regardant le **comportement de votre snoopy?**

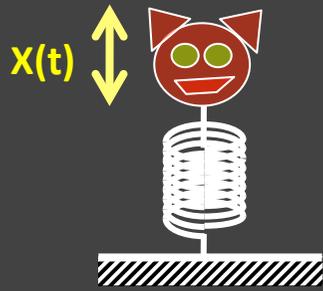
**NON**

Vous avez du travail à faire

**OUI**

Bravo. Vous avez réussi **un 1er exercice de modélisation physique**

Remarque 1 : Avez-vous remarqué que l'on a JAMAIS considéré la morphologie des choses, mais seulement des fonctions  $a(t)$  ?



## Qu'est ce que le mouvement ?

Quelque chose (un attribut) qui change au cours du temps, qui évolue?

Cette formulation est l'équation différentielle du 2<sup>nd</sup> ordre :  $M \frac{d^2x}{dt^2} + Z \frac{dx}{dt} + Kx(t)$

### La question n°2 est alors :

Est ce que vous pouvez associer cette écriture, en particulier les paramètres de cette équation, à l'objet réel gigotant qu'est votre snoopy dans votre salon sur qui vous tapotez la tête tous les soirs en rentrant chez vous ?

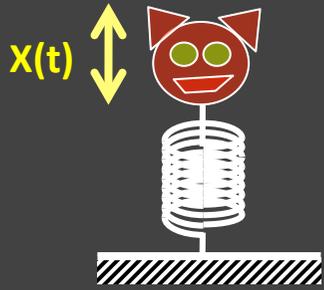
OUI

Bravo. Vous avez réussi **votre 1er exercice de compréhension physique d'une formulation ... Circulez, il n'y a plus rien à voir**

NON

C'est beaucoup plus intéressant ... Pourquoi ?

Nous ne pouvons pas faire autrement que de comparer les comportements: (1) observés de snoopy et (2) calculés de l'équation.



## Qu'est ce que le mouvement ?

Quel que chose (un attribut) qui change au cours du temps, qui évolue?

Cette formulation est l'équation différentielle du 2<sup>nd</sup> ordre :  $M \frac{d^2x}{dt^2} + Z \frac{dx}{dt} + Kx(t)$

**NON** Vous n'êtes pas capable et C'est beaucoup plus intéressant ... Pourquoi ?

Nous ne pouvons pas faire autrement que de comparer les comportements:  
(1) observés de snoopy et (2) calculés de l'équation.

Si ils sont les mêmes **[i.e.  $x(t)$ ,  $v(t)$ ,  $a(t)$ ]** à quelques epsilons près que vous êtes chargés d'évaluer (ce sera votre décision ... bonne ou mauvaise ...)

Alors VOUS ETES EN DROIT DE DIRE que L'EQUATION EST UN BON MODELE MATHEMATIQUE (on dira plus tard PHYSIQUE) de votre Snoopy REEL.

**Reste à poursuivre la correspondance**

Pour cela, je pictogrammiserai mon équation par le dessin suivant :

## Qu'est ce que le mouvement ?

Quel que chose (un attribut) qui évolue au cours du temps

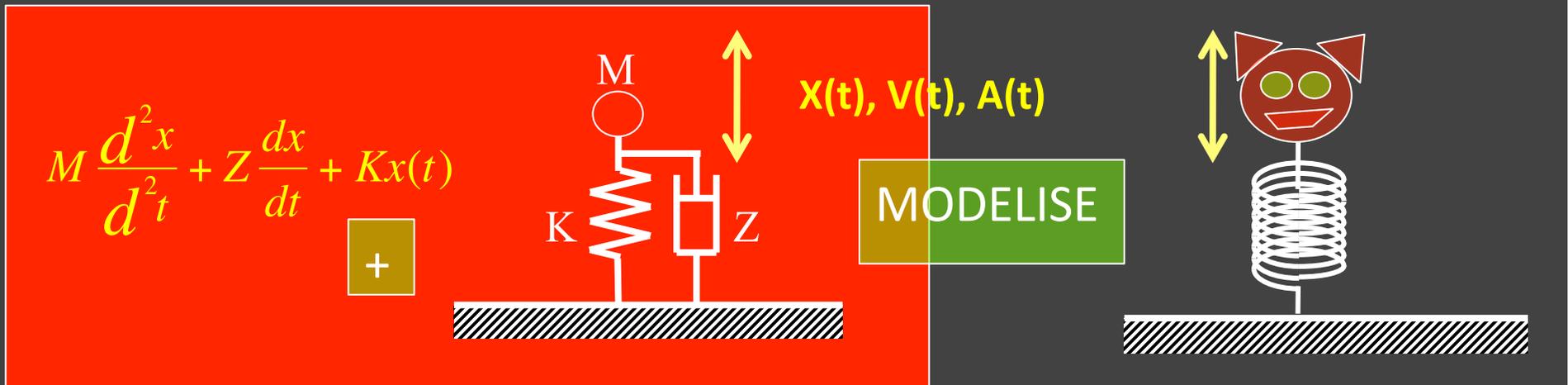
Cette formulation est l'équation différentielle du 2<sup>nd</sup> ordre :

Si les comportements, i.e.  $x(t)$ ,  $v(t)$ ,  $a(t)$  sont les mêmes (????) ....

Alors VOUS ETES EN **DROIT** DE DIRE que L'EQUATION EST UN BON MODELE MATHEMATIQUE (on dira plus tard PHYSIQUE) de votre Snoopy REEL.

### Reste à poursuivre la correspondance

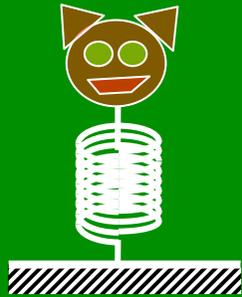
Pour cela, je vais pictogrammiser mon équation par le dessin suivant :



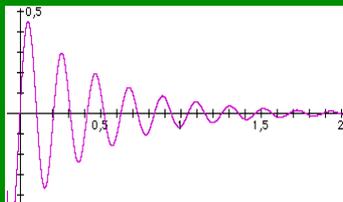
# Qu'est ce que le mouvement ? un attribut) qui évolue au cours du temps

Comportement observé

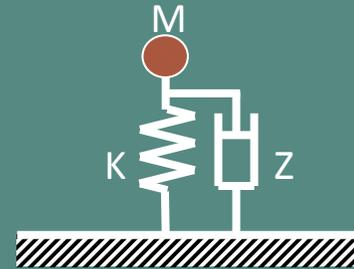
De snoopy



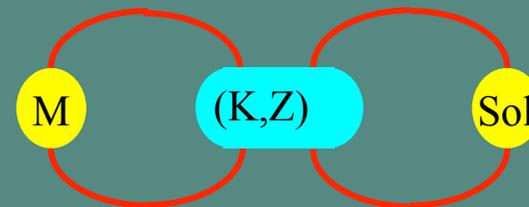
à modéliser



Modèle



$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + Z \frac{dx}{dt} + Kx(t)$$



Et on continue !!!!

## Question n°3

M, K, Z ont – ils une signification par rapport à Snoopy ou sont-ce juste des lettres ?

Mais avant de poursuivre

...

Qu'est-ce que je viens de faire devant vous  
avec mon exemple à 3 francs 6 sous ?

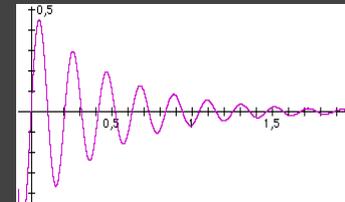
Un processus de  
modélisation de  
comportement  
dynamique

# Qu'est ce que le mouvement ? un attribut) qui évolue au cours du temps

Et on continue !!!!

Question n°3 : M, K, Z ont – ils une signification / Snoopy ou sont-ce juste des lettres ?

Réponse 1 : Ce sont juste des lettres [a, b, c] qui vont me permettre de faire le lien avec les comportements observés tels que dessinés



[M, K] vont déterminer la fréquence d'oscillation  
[M, Z] vont déterminer l'amortissement

$$x = A_0 e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \phi)$$

Réponse 2 : Ce ne sont pas que des lettres [a, b, c]

Ils ont **une signification "physique"** .... Le mot est enfin lâché ...

On va appeler :

M : inertie

K : élasticité

Z : viscosité

Mais pour le comprendre (ou l'admettre)

il se pose la question de ce qu'est "une force"

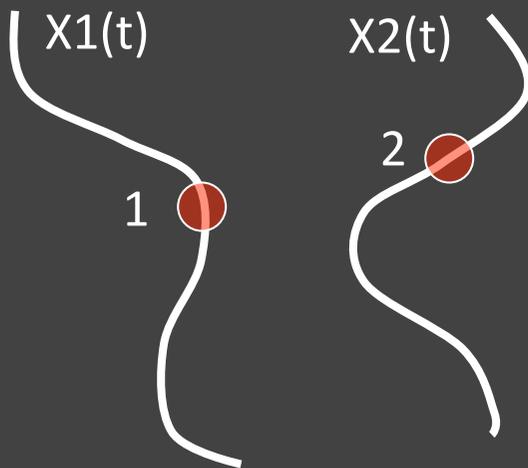
Qu'est ce que le mouvement ? un attribut) qui évolue au cours du temps

Et on continue !!!!

Réponse 2 : Les lettres M, K, Z ont **une signification "physique"**

On va les appeler : M : inertie, K : élasticité, Z : viscosité

Mais pour le comprendre (ou l'admettre) : qu'est - ce qu'"une force" : La "force" çà n'existe pas : cest le descripteur mathématique d'une corrélation dynamique



**J'OBSERVE QUE :**

V1(t) constant, circulez il n'y a rien à voir

OBS 1 : V1(t) non constant, A1(t)  $\neq 0$

OBS 2 : V2(t) non constant, A2(t)  $\neq 0$  .... Idem

OBS 3 : Comportement de 1 et de 2 corrélés.

→ 1● Et 2● S'influencent mutuellement

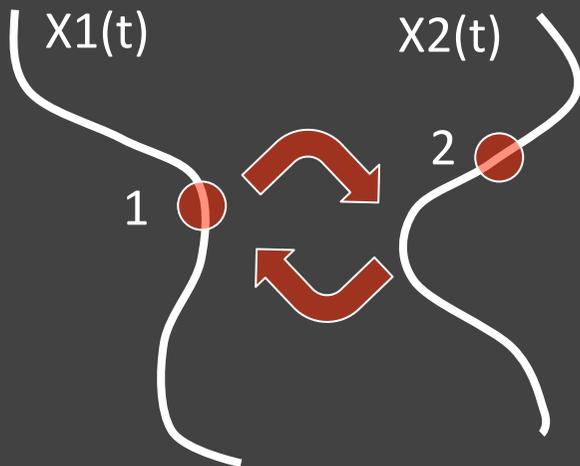
Deux façons d'écrire cette influence mutuelle (cette corrélation comportementale :

1. Corrélation { comportements dynamiques 1, comportements dynamiques } = 0 <sup>13</sup>

2. {Force 1>2, Force 2>1, Force 1>2 = Force 2>1}

# Qu'est ce que le mouvement ? un attribut) qui évolue au cours du temps

Et on continue !!!!



Façon 2 d'écrire les corrélations entre C1 et C2:  
{Force 1>2, Force 2>1, Force 1>2 = Force 2>1}

## Effet de cette corrélation sur 1 et sur 2

### Principe d'inertie

$F_{2>1} = M_1 * A_1(t) \dots$  explication ...

$F_{1>2} = M_2 * A_2(t) \dots$  explication ...

## Nature des corrélations :

1. Si la corrélation est une corrélation de la variable première (Ex.  $X(t)$ ) -> **corrélation élastique** (plus généralement potentielle)

Exemple simple :  $F(1>2 \text{ et } 2>1) = K * [X_1(t) - X_2(t)] \dots$  explication ...

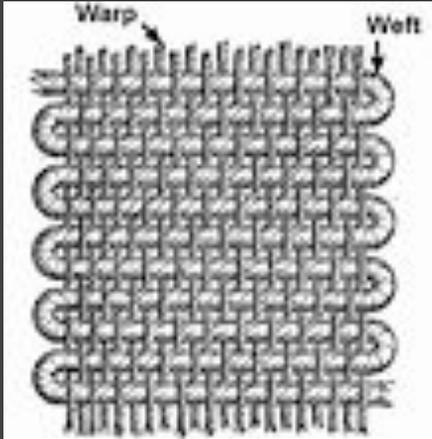
2. Si la corrélation est une corrélation de la variation de la variable première (Ex. Vitesse) -> **corrélation visqueuse** (plus généralement dissipative)

Exemple simple :  $F(1>2 \text{ et } 2>1) = Z * [V_1(t) - V_2(t)] \dots$  explication ...

# EXERCICE n°1 DE MODELISATION PHYSIQUE

## Tissu tissé ou tricoté

### OBSERVATION:



Un tissu tissé ou tricoté est fait de fils INDEFORMABLES, NON ELASTIQUES (laine, chanvre, coton, lin , fil de pêche ...

Mais les points restent à la même place les uns par rapport aux autres (à la déformation près) >>> c'est donc un **SOLIDE**.

Si je tire sur deux points, ils s'écartent. Cela n'est pas dû à l'élasticité des fils mais au tissage plus ou moins serré.



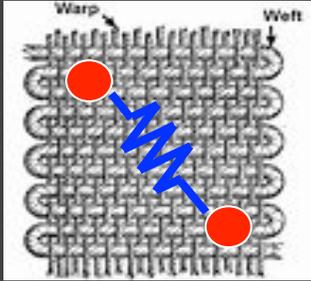
Je suis cependant en **DROIT** de déduire de mon **OBSERVATION des MOUVEMENTS**, que les mouvements de ces deux points sont corrélés en distance.

### MODELISATION:

Je peux donc rendre compte de cette corrélation en distance (par définition) par un ressort entre ces deux points

# EXERCICE n°1 DE MODELISATION PHYSIQUE

## Tissu tissé ou tricoté

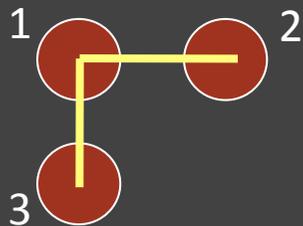


### OBSERVATION DE LA MODELISATION :

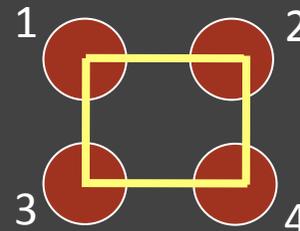
#### QUE FONT LES RESSORTS

Au repos, ils maintiennent les masses à une distance  $L_0$ .

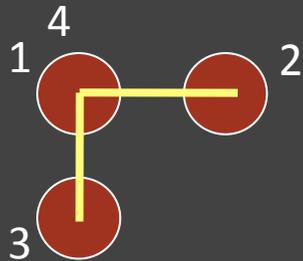
On peut les appeler “interaction élastique”, “contrainte en distance” ...



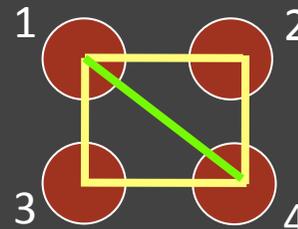
Au repos, 2 et 3 peuvent se trouver n'importe où sur le cercle centré en 1 de rayon  $L_0$ .



Pour que cela n'arrive pas, il faut que je rajoute une **contrainte en distance** >>> i.e. un ressort, une élasticité.



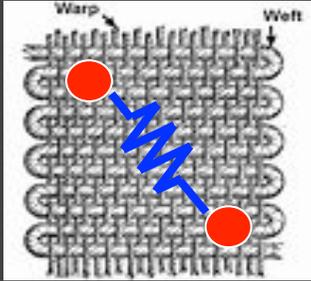
Mais au repos, 4 peut se trouver sur le 1 (idem pour 2 et 3)



Pour que cela n'arrive pas, il faut que je rajoute une **contrainte en distance** >>> i.e. un ressort, une élasticité.

# EXERCICE n°1 DE MODELISATION PHYSIQUE

## Tissu tissé ou tricoté

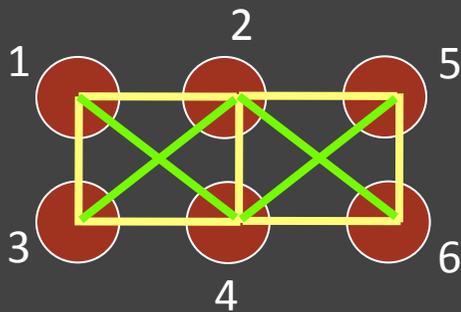


### OBSERVATION DE LA MODELISATION :

#### QUE FONT LES RESSORTS

Au repos, ils maintiennent les masses à une distance  $L_0$ .

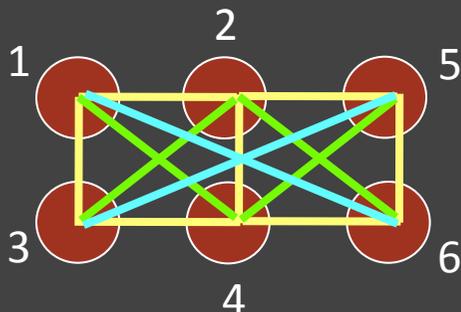
On peut les appeler "interaction élastique", "contrainte en distance" ...



Mais au repos, 5 et 6 peut se replier sur 1 et 2

Pour empêcher cela ...

Il faut rajouter des contraintes en distance (ressort)



Ces ressorts ne sont ni des ressorts dits d'élongation, ni de cisaillements ...

Leur équation peut être linéaire ou non

...

Ce sont des contraintes élastiques en distance que l'on rajoute pour maintenir la matière attachée

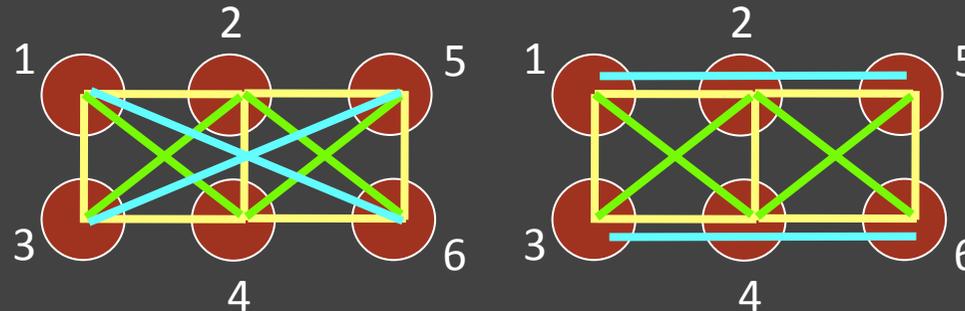
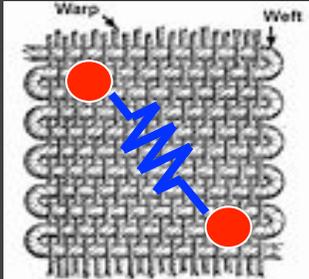
**Cependant :**

Ils ne sont pas cohérents avec une philosophie "maillage".

# EXERCICE n°1 DE MODELISATION PHYSIQUE

## Tissu tissé ou tricoté

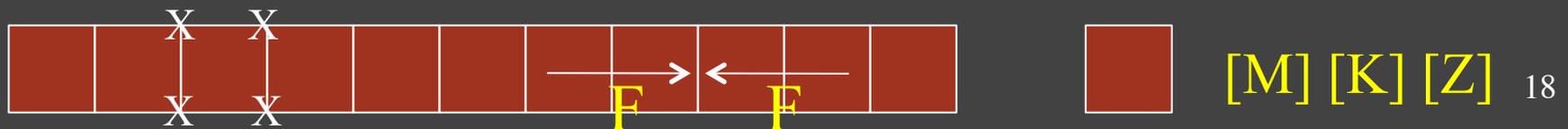
### OBSERVATION DE LA MODELISATION :



Ce sont des contraintes élastiques en distance que l'on rajoute pour maintenir le solide modélisé avec des **“pseudo mailles vides”**

**!!! Ceci n'advient pas lorsque on utilise des éléments finis non ponctuels, avec ou sans maillage !!! Car les éléments sont “PLEINS”.**

Morceaux « pleins » - Calcul aux nœuds – Forces de contiguité incluses dans le modèle. Ne doivent pas être rajoutées.



## CONCLUSION sur le processus de modélisation

1. “MODELISER” est un processus

2. OBSERVATION 1

2.1. Commencer par observer les comportements que l'on veut modéliser

2.2. Les spécifier OBJECTIVEMENT le mieux qu'on peut

3. MODELISATION:

Choisir une système de modélisation (n'importe lequel, pourquoi pas !!!)

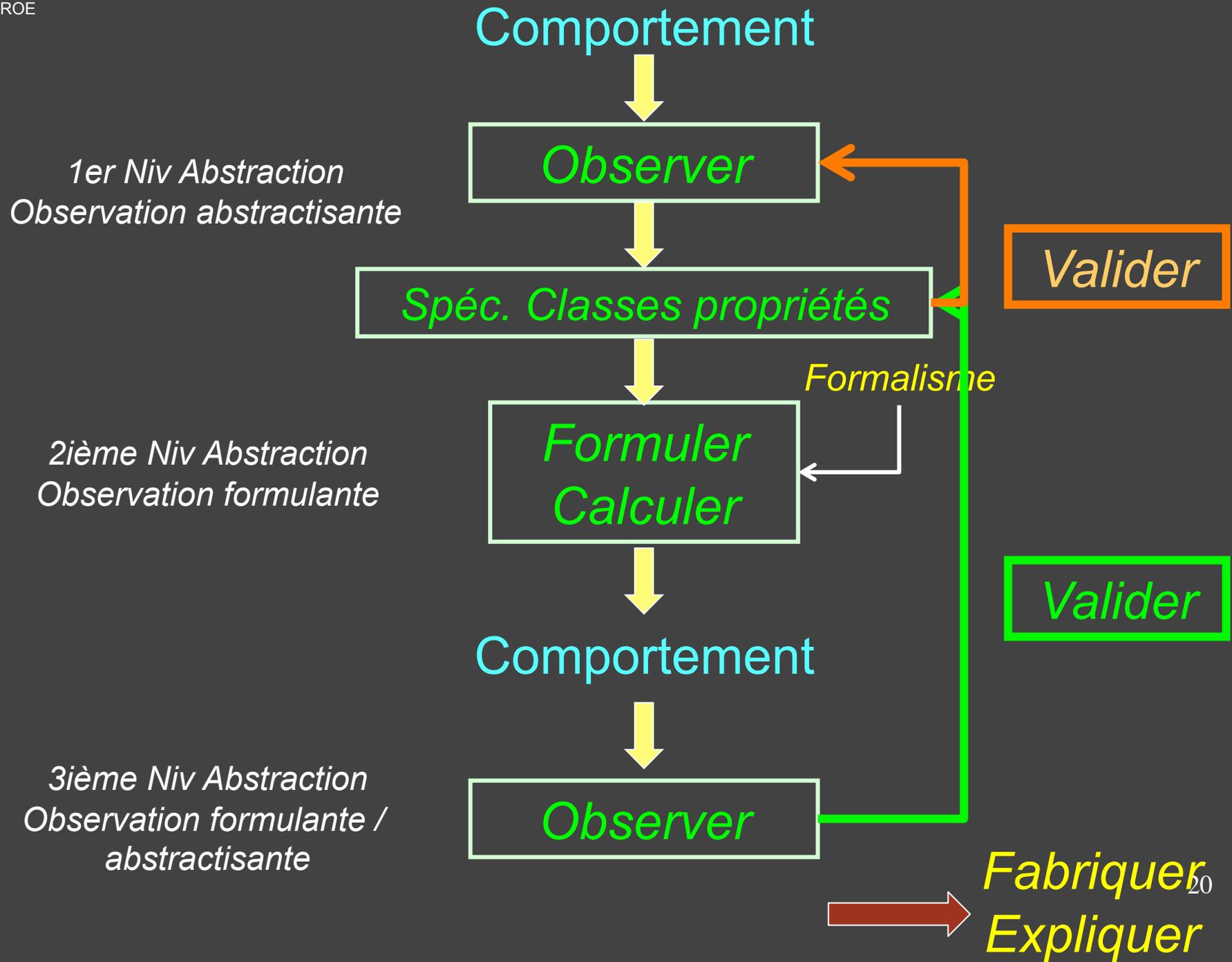
4. OBSERVATION 2 :

4.1. Observer le modèle que l'on fait,

4.2. Le comparer avec ce que l'on souhaite spécifier dans 2.2.

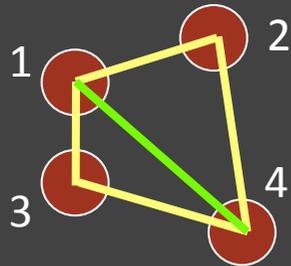
5. MODELISATION :

Modifier le modèle ... jusqu'à ce que vous ayez sommeil !!



# Et maintenant on va pouvoir se lancer dans EXERCICE n°2 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

Mais avant cela, une petite remarque, oh! Si petite !!!

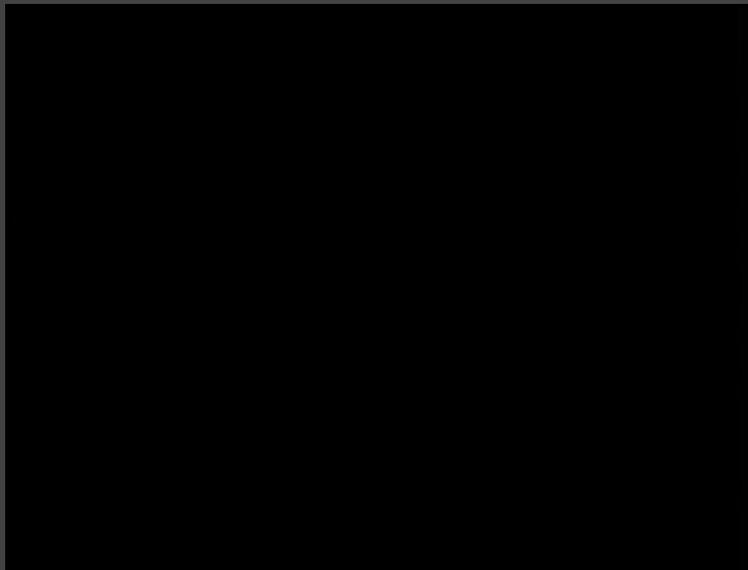


## NON LINEARITES GEOMETRIQUES ET NUMERIQUES

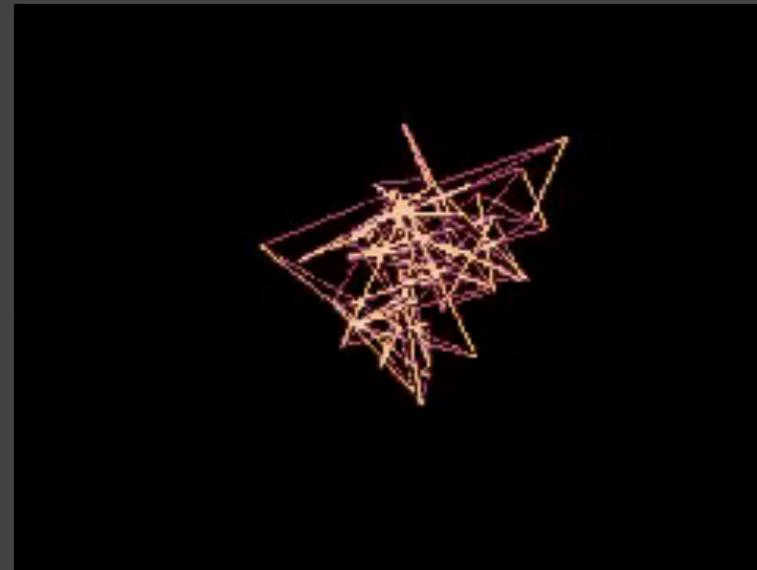
Le calcul des longueurs au repos [le L0vert par les L0jaune]

- Ça dépend de la représentation des nombres
  - Du calcul de la  $v$
- des emplacements spatiaux des points

Le processus de "MODELISER" va jusqu'au calcul numérique dans l'algorithme



Hélice-Godard-Luciani, 1994



Ballon-C60-Godard-Luciani, 1994

Et maintenant on va pouvoir se lancer dans EXERCICE n°2 DE MODELISATION  
PHYSIQUE plus complexe

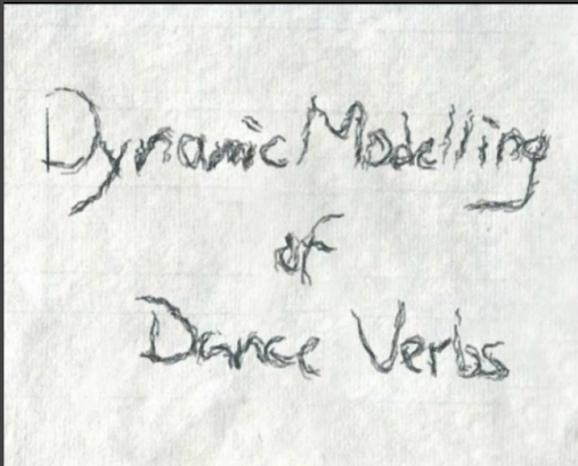
Mais avant cela, une autre petite remarque, oh! Si petite !!!

Lorsque vous observez le comportement à modéliser :

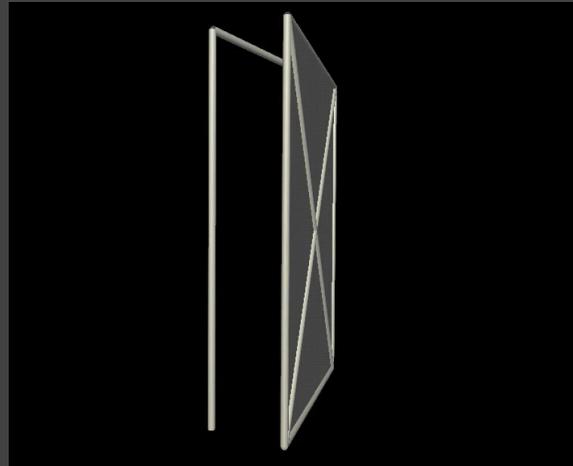
Détachez vous le plus possible de la forme et de son apparence visuelle  
Vous verrez mieux le comportement dynamique

Lorsque vous observez le comportement de votre modèle:

Prenez les formes les plus simples et les moins homéomorphiques  
Vous verrez mieux le comportement dynamique



Mouvements Dansés  
Hsieh-Luciani, 2006



Relation Formes – Mouvements (Porte & épingle)  
Cherkaoui-Luciani, 2009



# EXERCICE n°2 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

Formalisme CORDIS-ANIMA Masses - Ressorts – Frottements ou masses-interactions

## SABLE

1er Niv Abstraction  
Observation abstractisante

Observer

Spéc. Classes propriétés

Valider

Comportements n°1  
Amoncellements – Tas – Remblais



Comportements n°2  
Terrains – Landes - Plages

SABLE 1

SABLE 2

# EXERCICE n°2 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

## SABLE 1

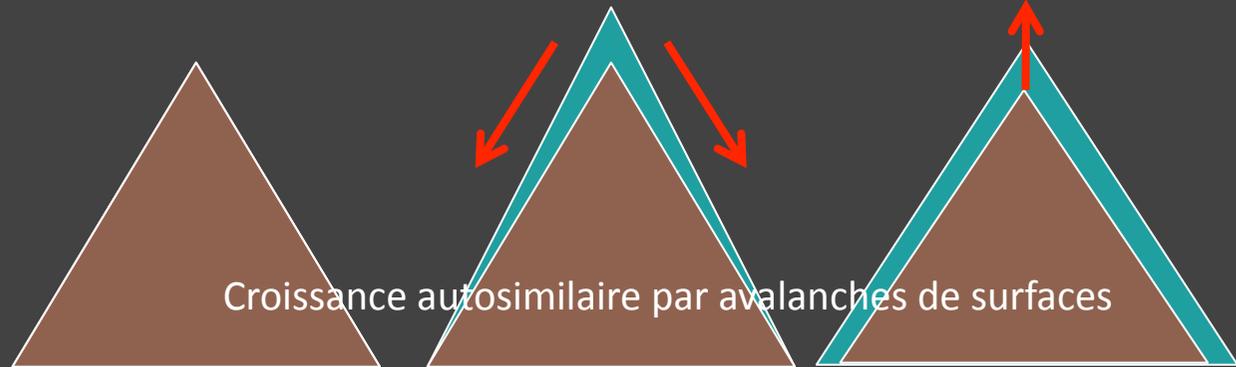
1er Niv Abstraction  
Observation abstractisante

Observer

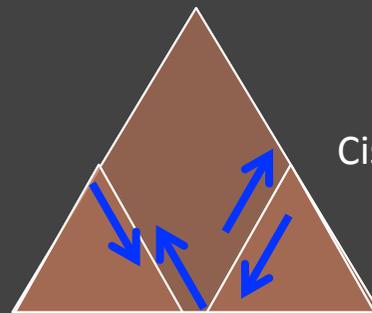
Spéc. Classes propriétés

Valider

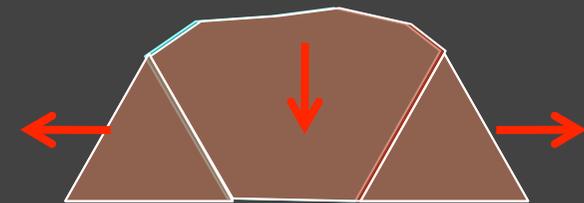
- Empilements
- Croissance autosimilaire
- Avalanches de surface



- sous-tas autosimilaires
- Effondrements internes
- Hétérogénéité interne



Cisaillements

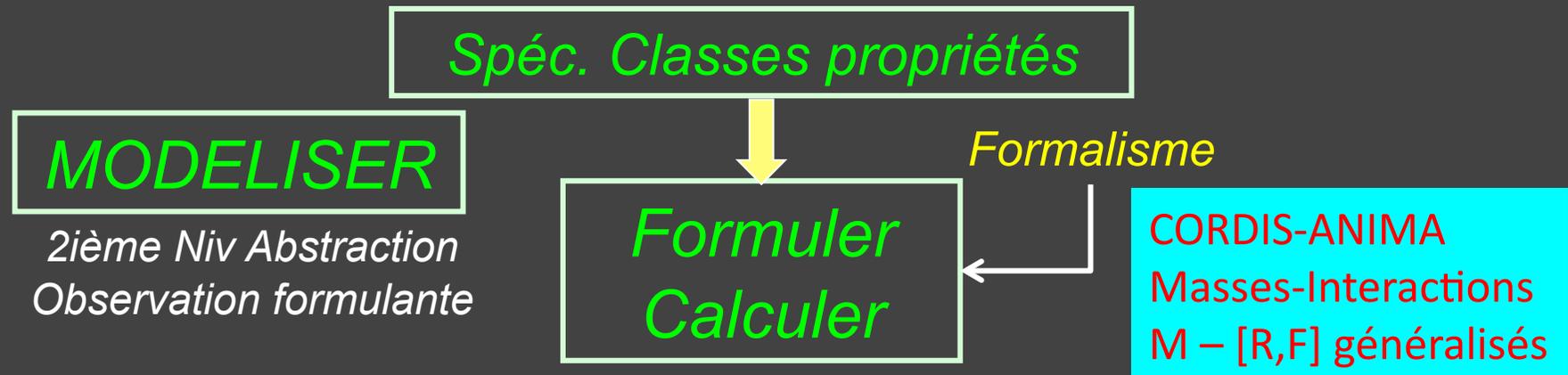


Sous - tas autosimilaires

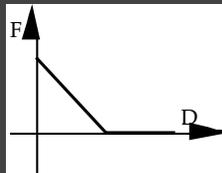
Effondrements internes

# EXERCICE n°2 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

## SABLE 1



BUT



MASSE - Sable

$n \cdot (n-1) / 2$  interactions BUT



MASSE - Sable

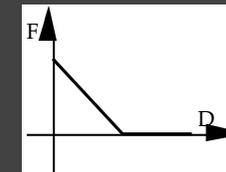
n interactions FRO

FROS



SOL

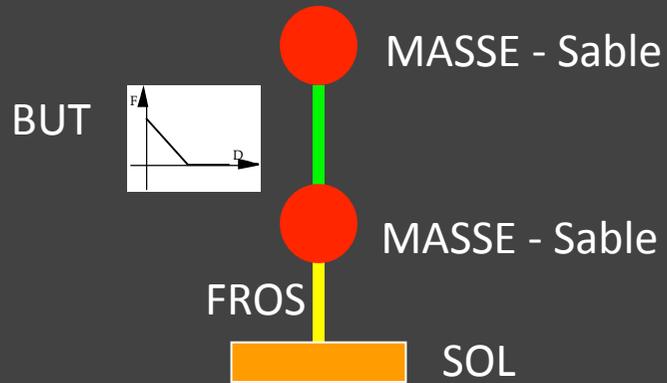
BUT



BUT => Collisions  
N'est pas considéré  
comme une force externe.  
Pourquoi?

## EXERCICE n°2 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

# SABLE 1

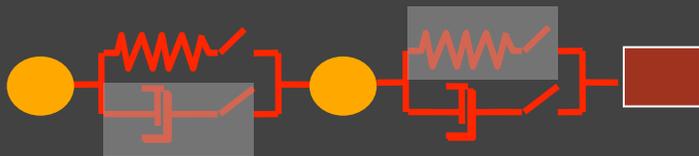


Tous les effets apparaissent si et seulement si :

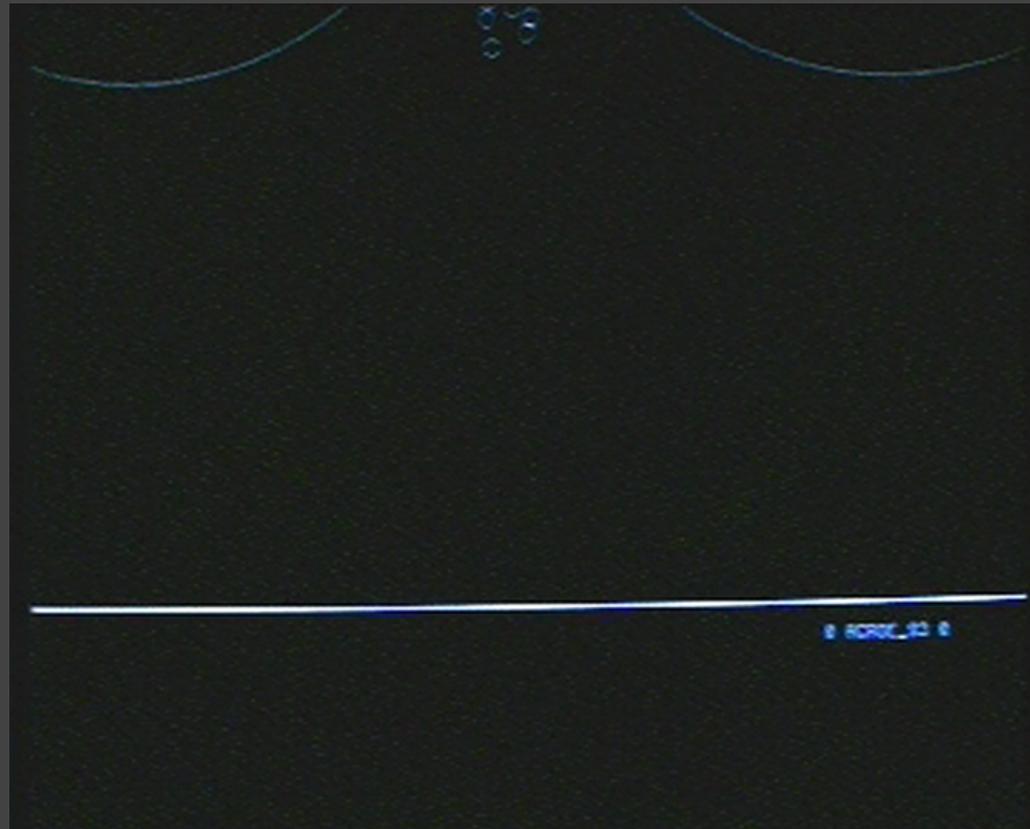
>>> Ressort Butée (collisions) entre toutes les masses

>>> Frottement entre toutes les masses et le sol

- ✓ Le nombre de masses
- ✓ La forme des grains – i.e. de masses (ponctuels ou non)



Sables-Manzotti-Luciani, 1993



## EXERCICE n°2 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

# SABLE 1

Mathématé - > Notion de Modeleur « système de modélisation » vocabulaire + syntaxe

Modeleur géométrique: opérateurs de la géométrie

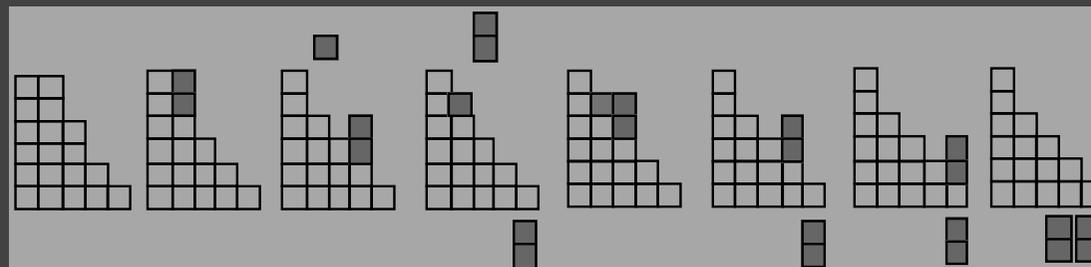
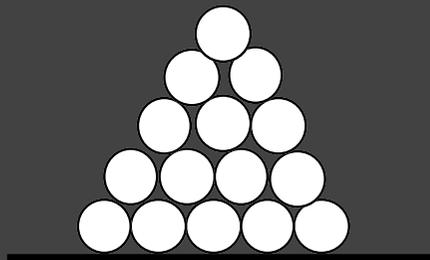
[Point, ligne, etc.] [distance, produit scalaire, etc.]

Exemple: modèle géométrique de tas de sable,  
modèle géométrique de l'optique,  
modèle géométrique de déformations

Modeleur logique: opérateurs de la logique

Prédicats

Exemple: modèle logique de tas de sable (jeu de Tetris)

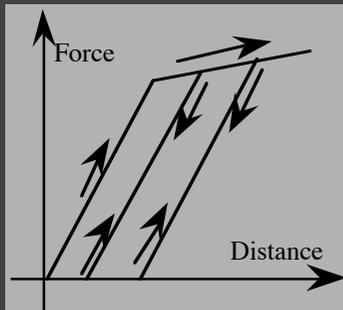


# EXERCICE n°2 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

## SABLE 2

Spécifications Classes propriétés

- Traces >> Plasticité
- Seuil de Tassement



Observer

Spéc. Classes propriétés

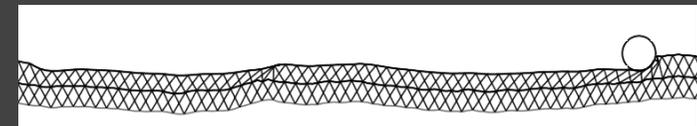
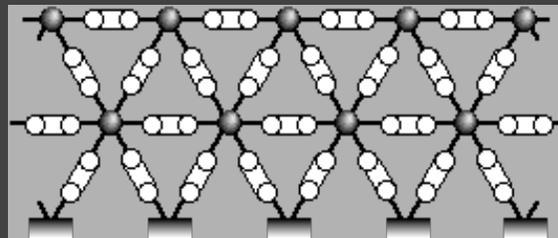
Valider

Formuler  
Calculer

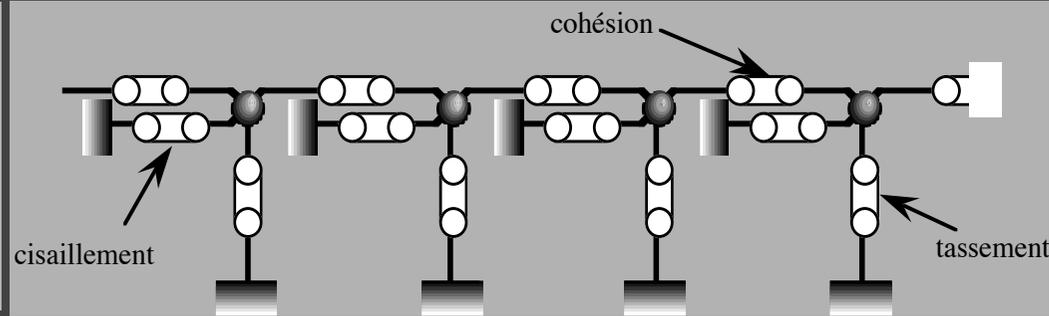
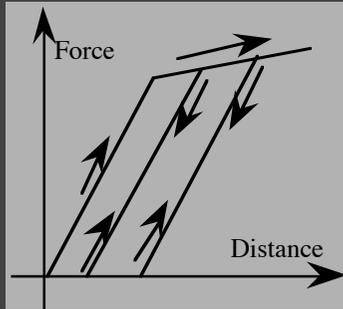
Formalisme

CORDIS-ANIMA  
Masses-Interactions  
M – [R,F] généralisés

1<sup>er</sup> modèle :  
plusieurs couches.  
Mimétisme géométrique  
Elasticités avec plasticité

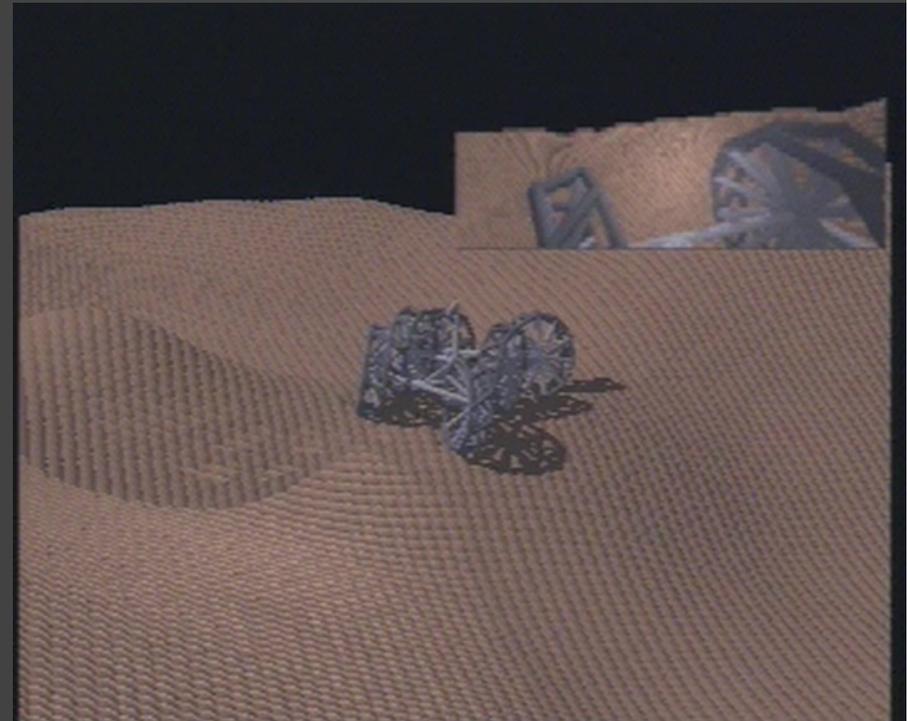
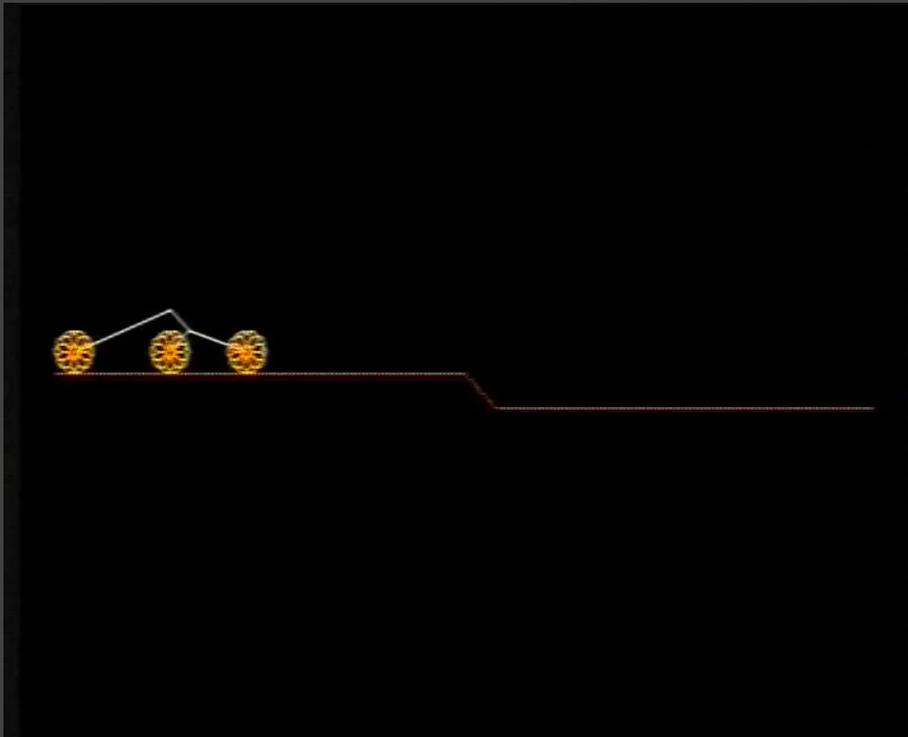


Mauvais : fripures



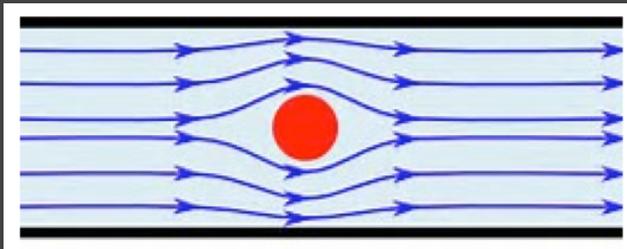
Cisaillement et tassement  
Modèle optimal  
pas d'interactions croisées (n).  
Nbre masses fct. Tailles des  
roues et non la finesse du sol.

**2ième Modèle : Monocouche – Satisfait les spécifications comportementales  
Trois interactions élasto-plastiques : (1) de cohésion; (2) de cisaillement; (3) de tassement**



# EXERCICE n°3 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

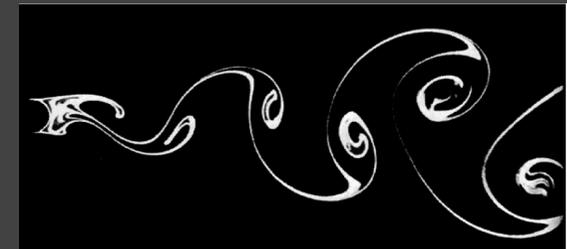
## FLUIDE



Ecoulements laminaires



Tourbillons Kelvin-Helmoltz



Allées de von Karman

# EXERCICE n°3 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

## FLUIDE

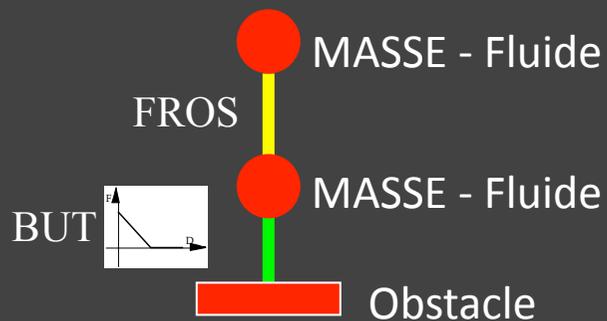
Ecoulements laminaires  
Tourbillons Kelvin-Helmoltz  
Allées de von Karman

*Spéc. Classes propriétés*

*Formalisme*

*Formuler  
Calculer*

CORDIS-ANIMA  
Masses-Interactions  
M – [R,F] généralisés

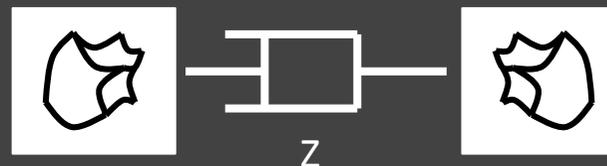
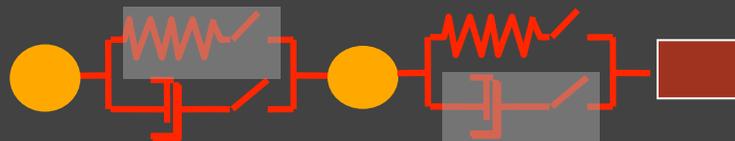


Tous les effets apparaissent si :

- >>> Frottement visqueux entre toutes les masses
- >>> Butée élastique entre toutes les masses un obstacle
- >>> Prédominance de la viscosité

Que représente les masses ?

Des parcelles de fluides



# EXERCICE n°3 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

## FLUIDE

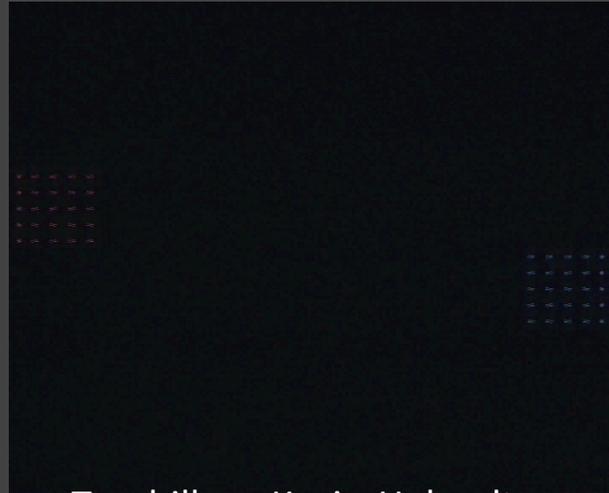
Ecoulements laminaires  
Tourbillons Kelvin-Helmoltz  
Allées de von Karman

*Formuler*  
*Calculer*

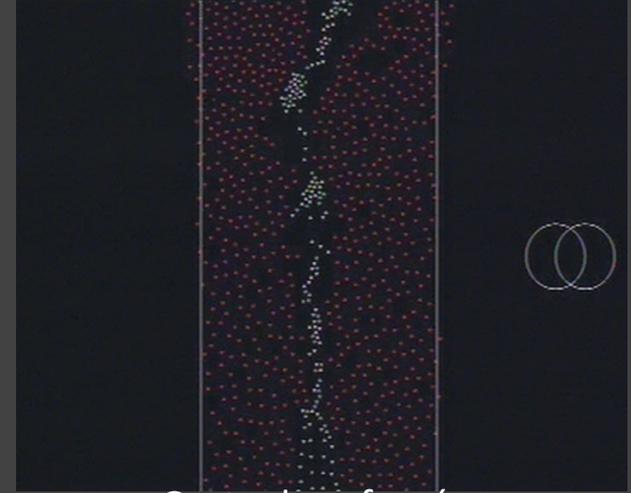
Comportement

*Observer*

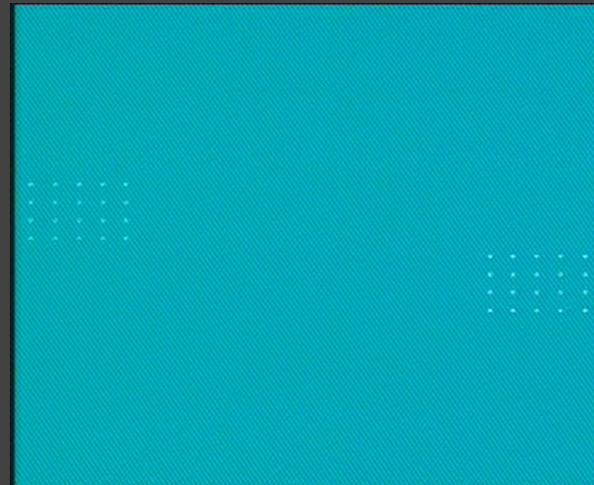
*Valider*



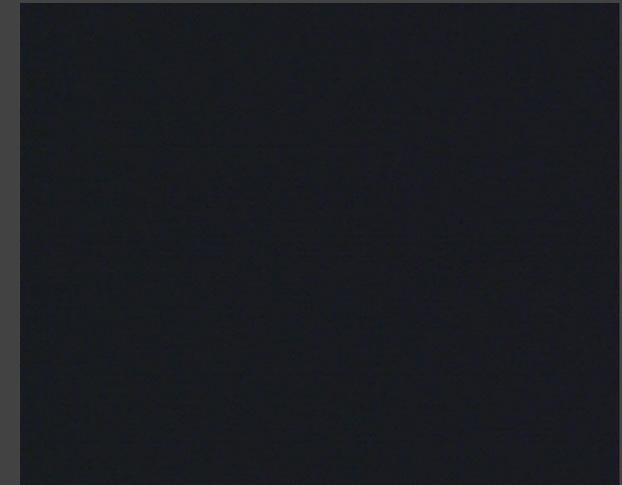
Tourbillons Kevin-Helmoltz



Geste dans fumées



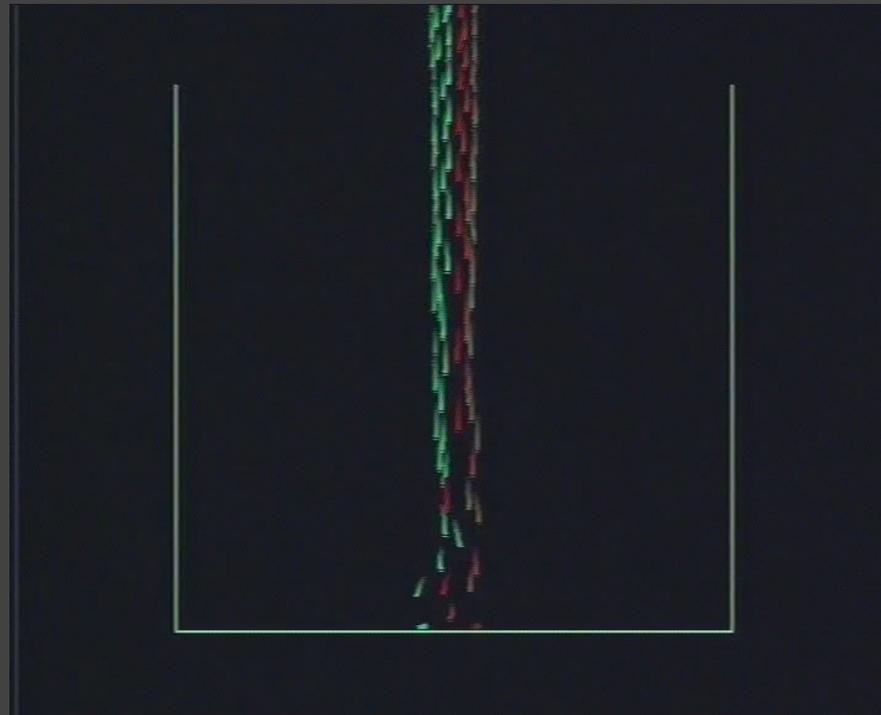
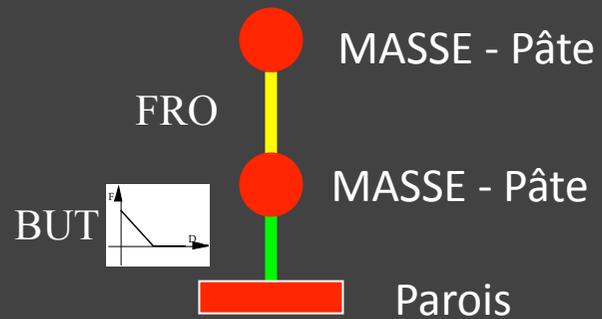
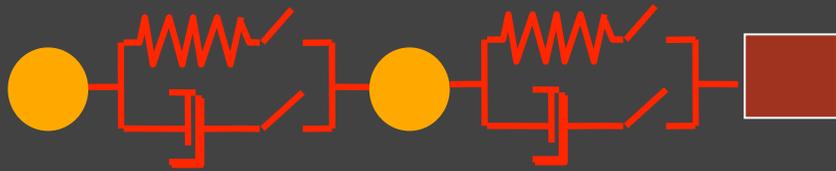
Laminaires-Tourbillons



Filaments

# EXERCICE n°4 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

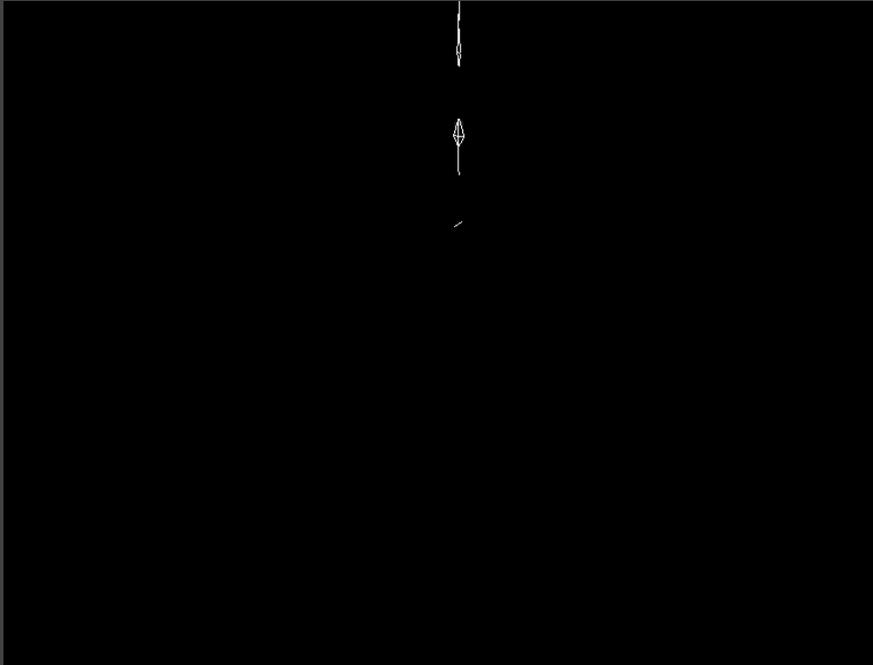
## PATES - GELS



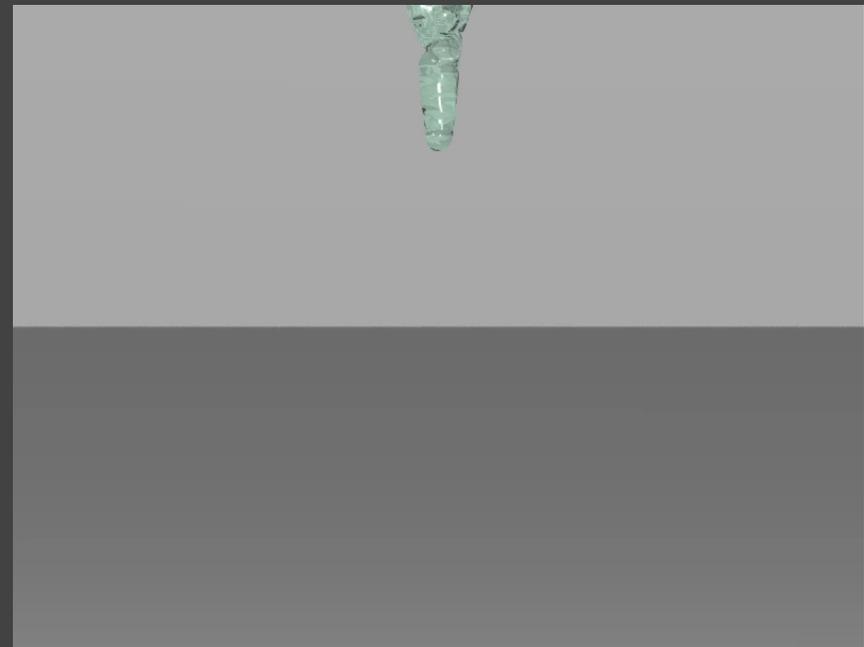
Pâtes - Zein, Luciani 2000

EXERCICE n°4 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

# PATES - GELS



Pâtes 1 – Guilbaud, Luciani 2002



Pâtes 2 – Guilbaud, Luciani 2002

# EXERCICE n°6 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

## FOULES

Spéc. Classes effets

Files

Embouteillages

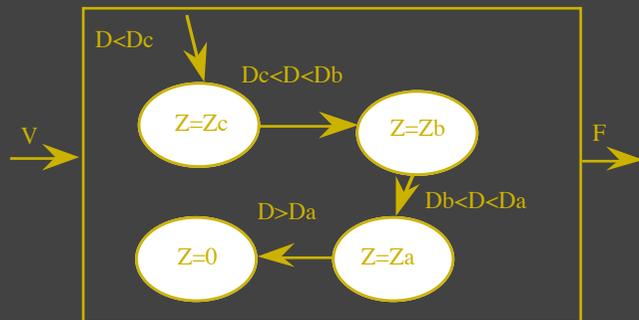
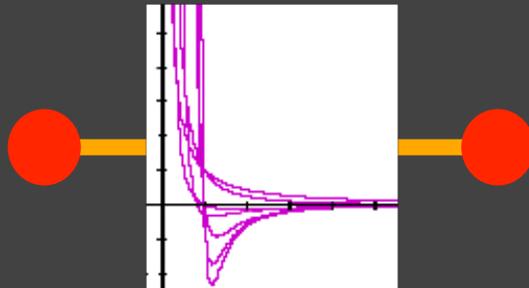
Contournements

Retours en arrière

Modèle

Interaction « distance » de COHESION (attractive-répulsive)

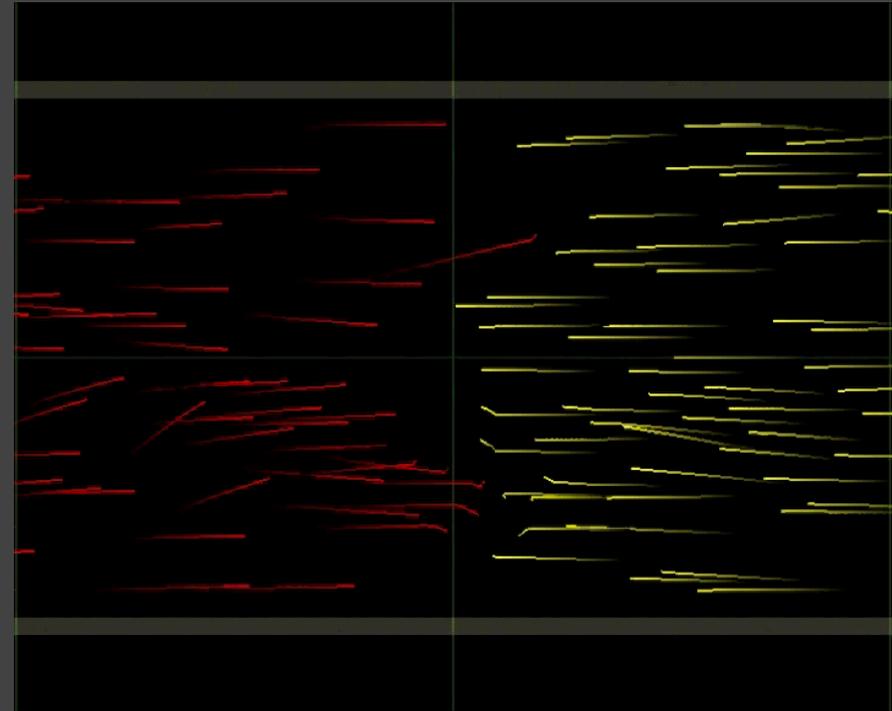
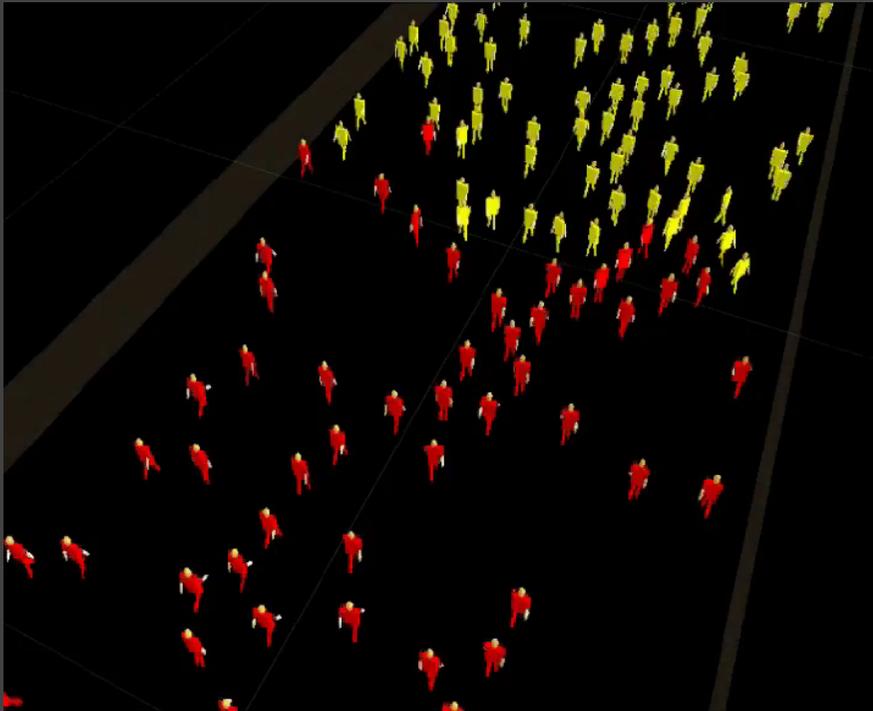
Interaction Visqueuse à plusieurs seuils de distance



Foules 1 - Luciani, Byram, Thil, 2003 - 2004

EXERCICE n°6 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

# FOULES



Foules 2 - Luciani, Byram, Thil, 2003 - 2004

# RETOUR SUR LES TYPES D'INTERACTION

Il n'y en a que 2

## Ordre 0

Qui corrèle l'attribut d'ordre 0  $X(t)$   
Force (1,2) :  $F(X_1, X_2)$

Ressort (linéaire ou non)  
Plasticité, Attraction  
Répulsion, Cohésion

...

## Ordre 1

Qui corrèle la variation de l'attribut  $X(t)$   
Force (1,2) =  $\Phi(V_1, V_2)$

Frottement visqueux  
Frottement secs  
Linéaires ou non

...

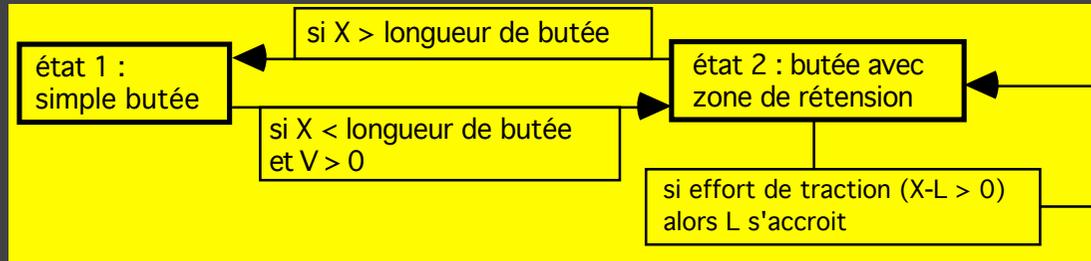
Rappel :  
Ordre 2 : Inertie

Voilà pourquoi je préfère parler d'interactions que de Ressorts

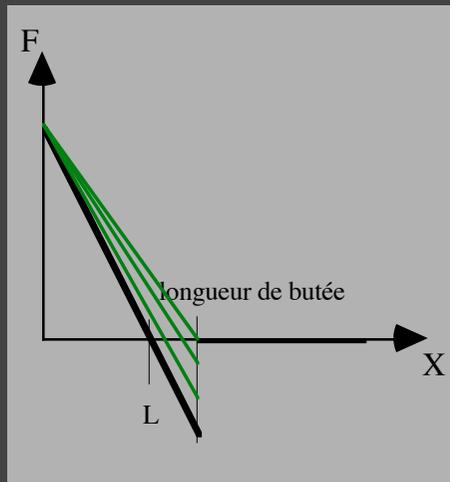
# EXERCICE n°5 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

## GOUTTE D'EAU

Et on continue !!!!



*Butée adhérente  
(effet de striction)*

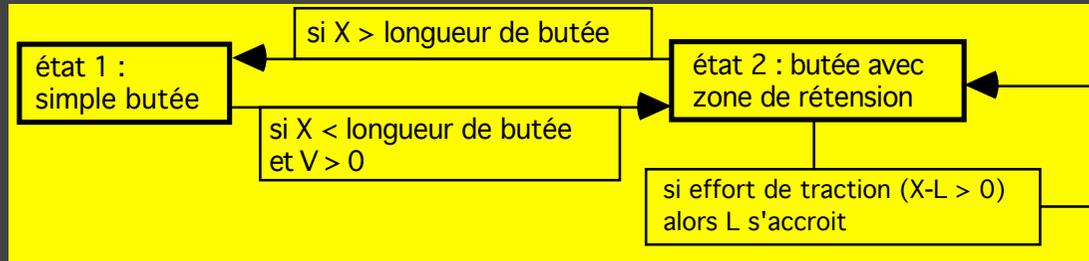


*Adhérence  
de goutte d'eau  
une goutte*

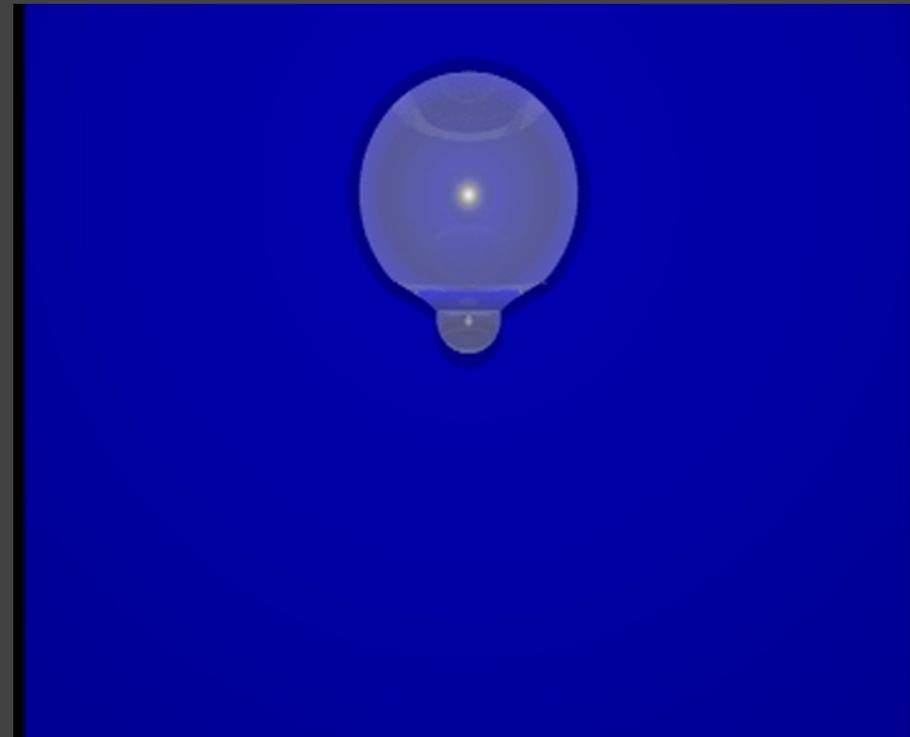
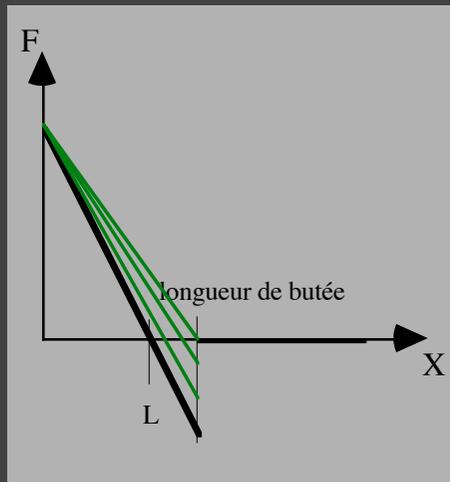
# EXERCICE n°5 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

## GOUTTE D'EAU

Et on continue !!!!



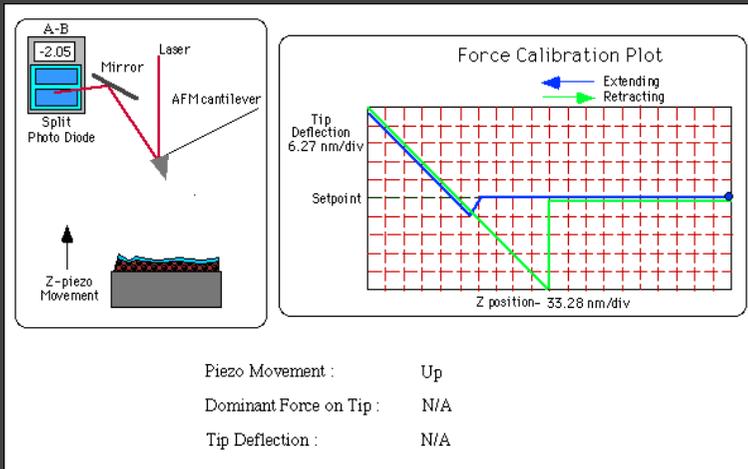
*Butée adhérente  
(effet de striction)*



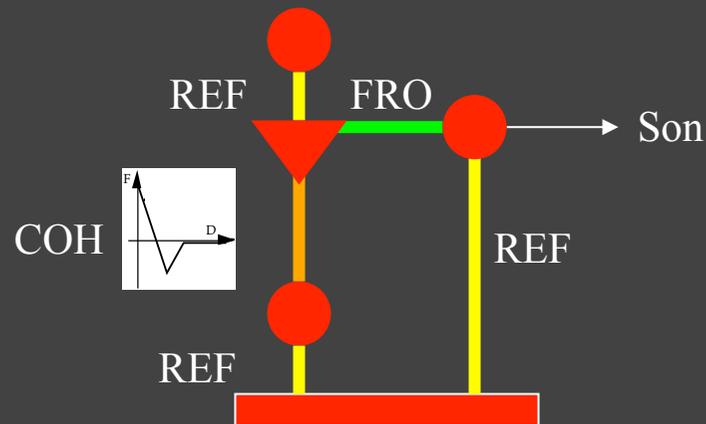
# EXERCICE n°8 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

## Cohésion COH : Adhérence dissymétrique

Plus généralement changement d'état sur les interactions



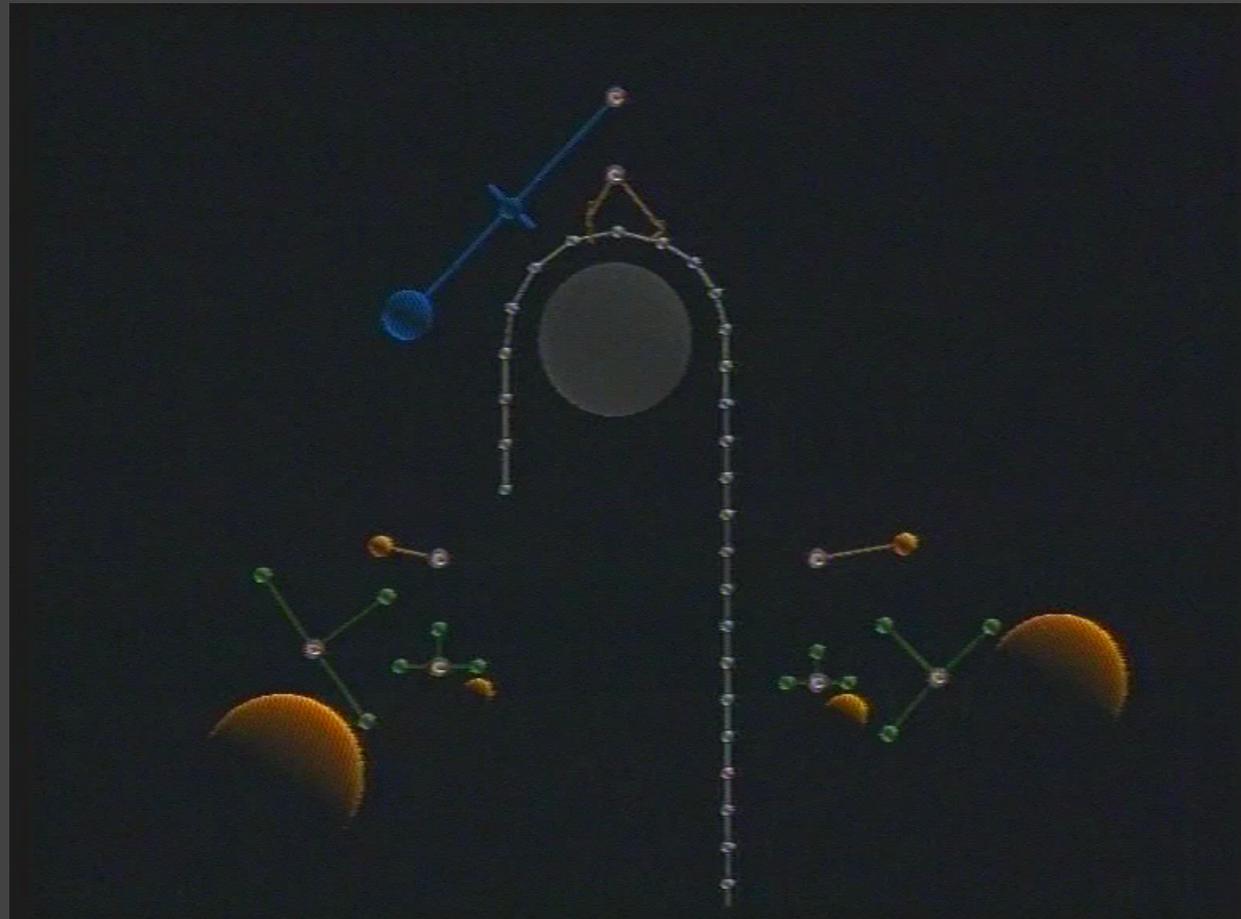
Nanomanipulation  
Multisensorielle à retour d'effort



EXERCICE n°9 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

# Mécanismes complexes

Véhicules – Interactions roues / sol - Horloge



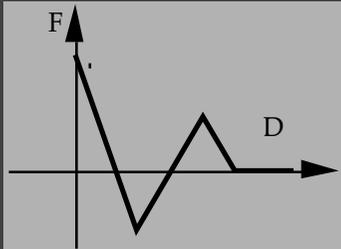
Horloge, Nouiri, Cadoz, Luciani 1993)

Réalisme ???  
DE Quoi ???

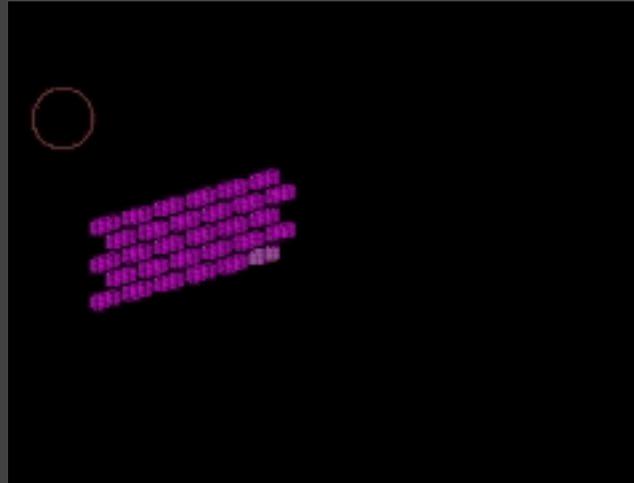
# EXERCICE n°10 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

## FRACTURES 1

Plus généralement changement d'état sur les interactions



Interaction de  
cohésion irréversible

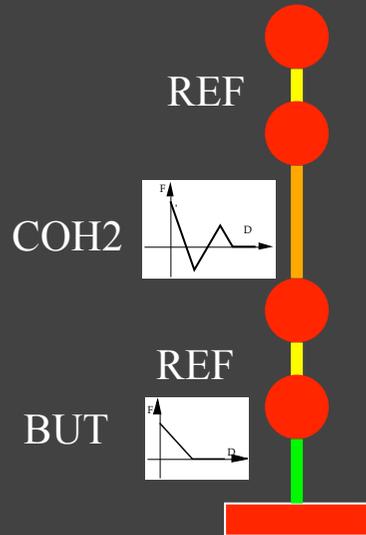


Mur – Fracture, Luciani, Godard 1994

Très petites Déformations  
Moyenne fréquence  
Nœuds et ventres



Colonne – Fracture, Luciani, Godard 1994



Reflexions sur la  
fréquence de  
simulation

EXERCICE n°11 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

## FRACTURES 2 – Méthode des MAT éclatables

changement de structures des interactions sur les masses – Conservation de l'état dynamique à la transition.

**Système dynamique : sensible aux conditions initiales**

**Fractures : changement brutal des CI**

**Problème de la conservation du système dynamique à la transition**

**On raisonne à l'envers : on ne casse pas des masses, on les unit.**

**Fracture, déchirure ... = désunions**

**Dans le modèle, le nombre de masses est prévu pour être celui de l'état fracturé**

**Toutes les interactions existent**

**Avant fracture, elles s'appliquent à toutes les masses unies susceptibles de se désunir**

**Après fractures, les interactions s'appliquent sur leurs masses seules.**

**Avant et après la transition, les masses sont à la même position et toutes les élongations sont égales : les forces sont conservées.**

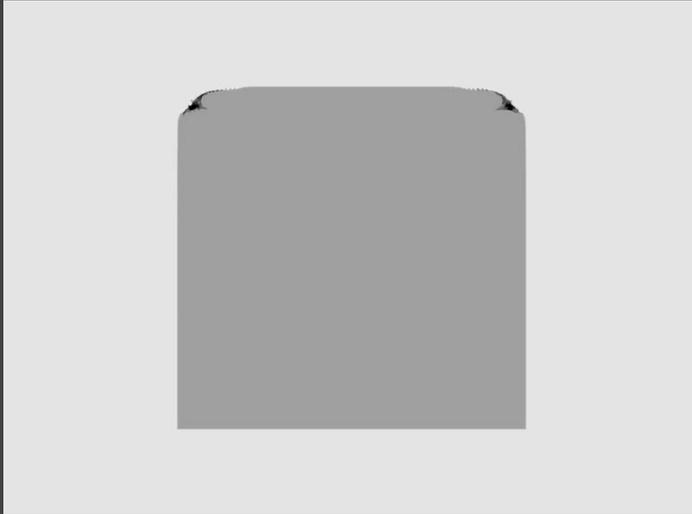
**Pas de changement brutal ni de forces, ni de positions, ni de vitesses.**

EXERCICE n°11 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

## FRACTURES 2 – Méthode des MAT éclatables

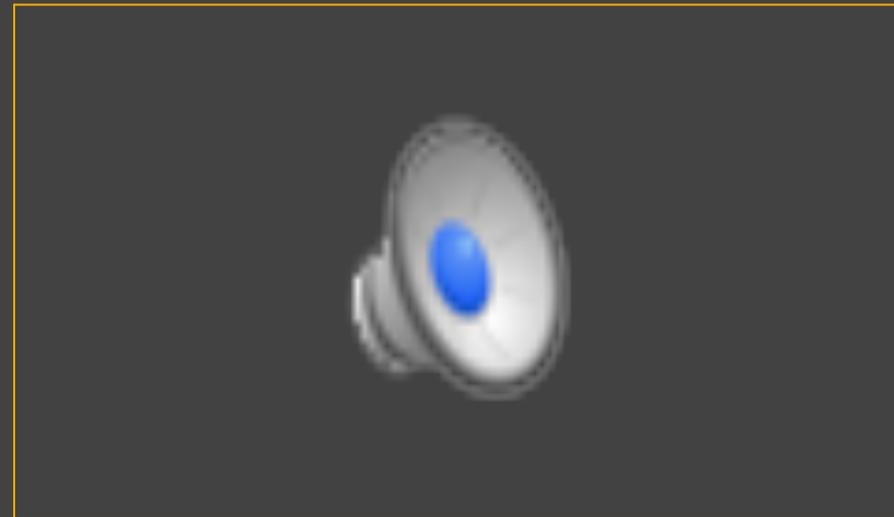
changement de structures des interactions sur les masses

Conservation de l'état dynamique à la transition.



Déchirure 1 – Kalantari, Luciani, 2013

Déchirure 2 – Kalantari, Luciani, 2013



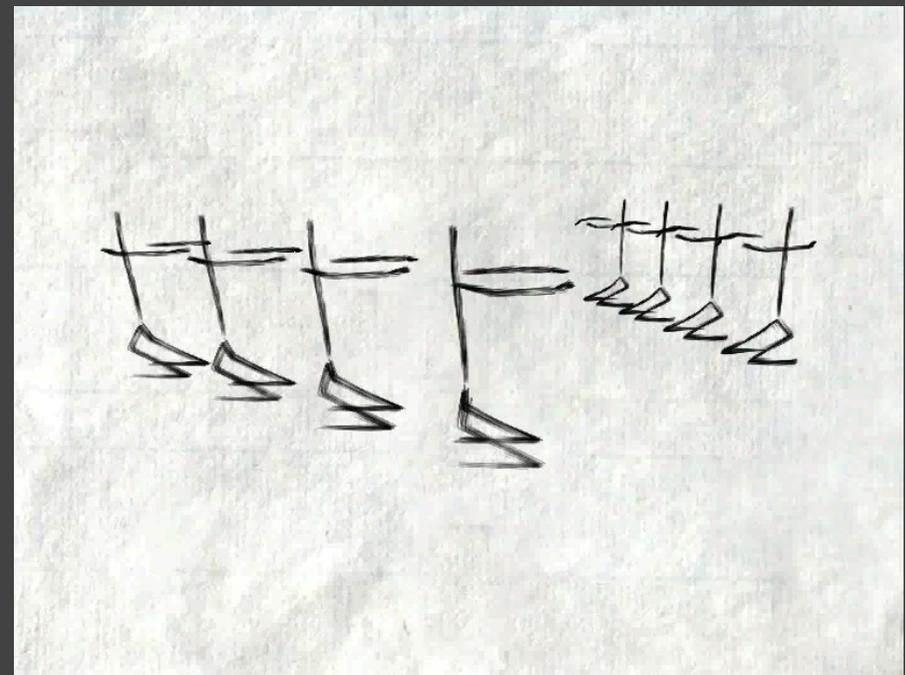
Eclatement– Riffet, Luciani, Castagné, 2017

EXERCICE n°12 DE MODELISATION PHYSIQUE plus complexe

# La notion de couplage

## Mouvements dansés

Mouvement dansé – Hsieh, Luciani, 2013

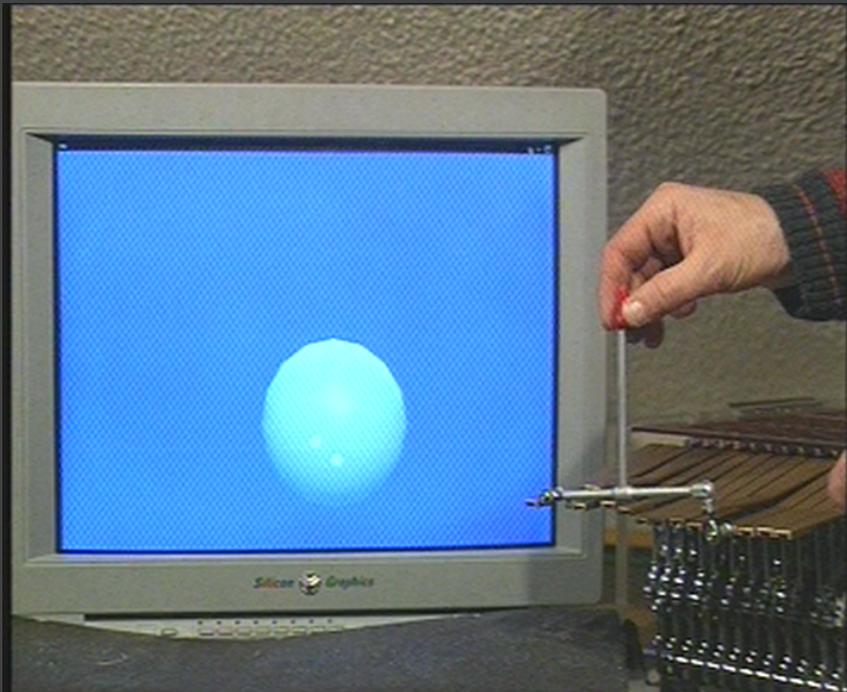


Mouvements dansés couplés – Hsieh, Luciani, 2013

# TEMPS REEL - Interaction haptique - Son

Principe conceptuellement et techniquement compatible avec l'interaction haptique : un système à retour d'effort est une masse, qui reçoit une force et produit une position

Principe conceptuellement et techniquement compatible avec la génération du son:  
Variation d'une force ou d'un déplacement calculé à 44 kHz envoyé sur un HP.



**Complexité**  
En 1D, à 44 kHz, on peut simuler jusqu'à 500 000 modules masses ou interactions linéaires ou non

# Processus de modélisation – CONCLUSION

1. La physique traite des comportements  
comportement inertiel, comportement élastique, comportement visqueux, etc.

**TOUT SE PASSE COMME SI (et non pas c'est comme ça)**

2. On modélise des comportements qu'il faut donc au préalable spécifier

3. Une interaction physique décrit une corrélation comportementale entre deux comportements

3. Sa propriété essentielle est le PRINCIPE d'ACTION-REACTION qui n'admet pas d'être contredit

4. Quelque soit le formalisme choisi, le MODELE PHYSIQUE, c'est:  
Le principe INERTIEL + Le principe d'ACTION-REACTION

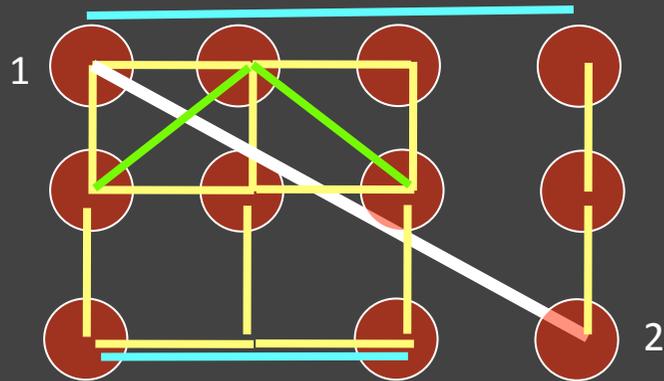
5. La force n'existe pas : elle est un descripteur du principe d'ACTION-REACTION:  
 $F_{a>b} = -F_{b>a}$

On pourrait l'appeler **“CONTRAINTE BILATERALE”**

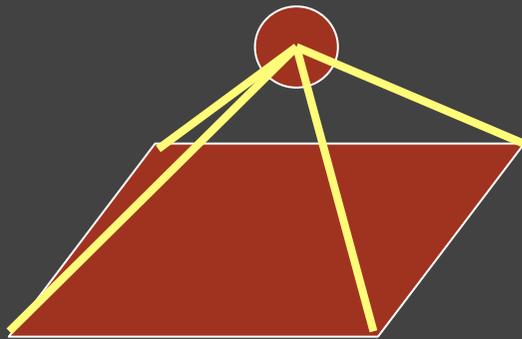
6. La masse ponctuelle elle-même n'existe pas en tant que présence de matière.  
Exemple le BARYCENTRE

# Processus de modélisation – CONCLUSION

1. On pourrait l'appeler "CONTRAINTE BILATERALE"



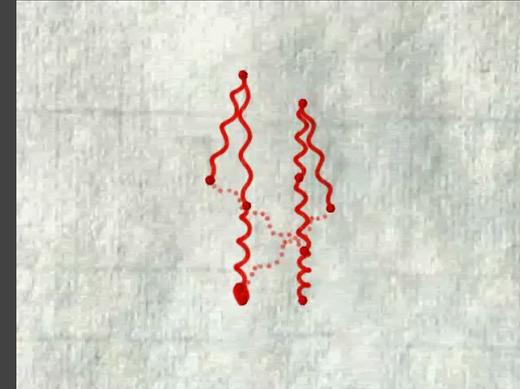
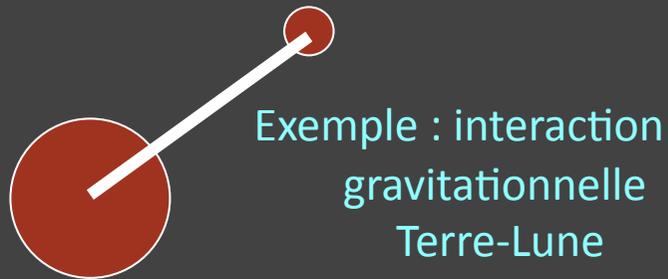
Exemple : interaction élastique blanche  $F = K*(L - L_0)$  pour maintenir les deux masses 1 et 2 à  $L_0$  au repos



Exemple : Haubannage pour contraindre la flexion de la feuille

# Processus de modélisation – CONCLUSION

1. On pourrait l'appeler "CONTRAİNTE BILATERALE"



Exemple : interaction croisée pour l'opposition des mouvements main-genou



Appeler une interaction "RESSORT" ou "AMORTISSEUR" matérialise et conduit à l'erreur de compréhension

# Processus de modélisation – CONCLUSION

La topologie d'un réseau Masses – Interactions n'a rien à voir conceptuellement avec une topologie "maillage".

La topologie "maillage" suppose la continuité spatiale  
Elle est donc adaptée à la représentation des solides

La topologie masses - interactions ne la suppose pas  
Elle est adaptée à n'importe quel comportement

Si on veut les associer : il faut "modéliser"  
C'est ce que font par principe les éléments finis

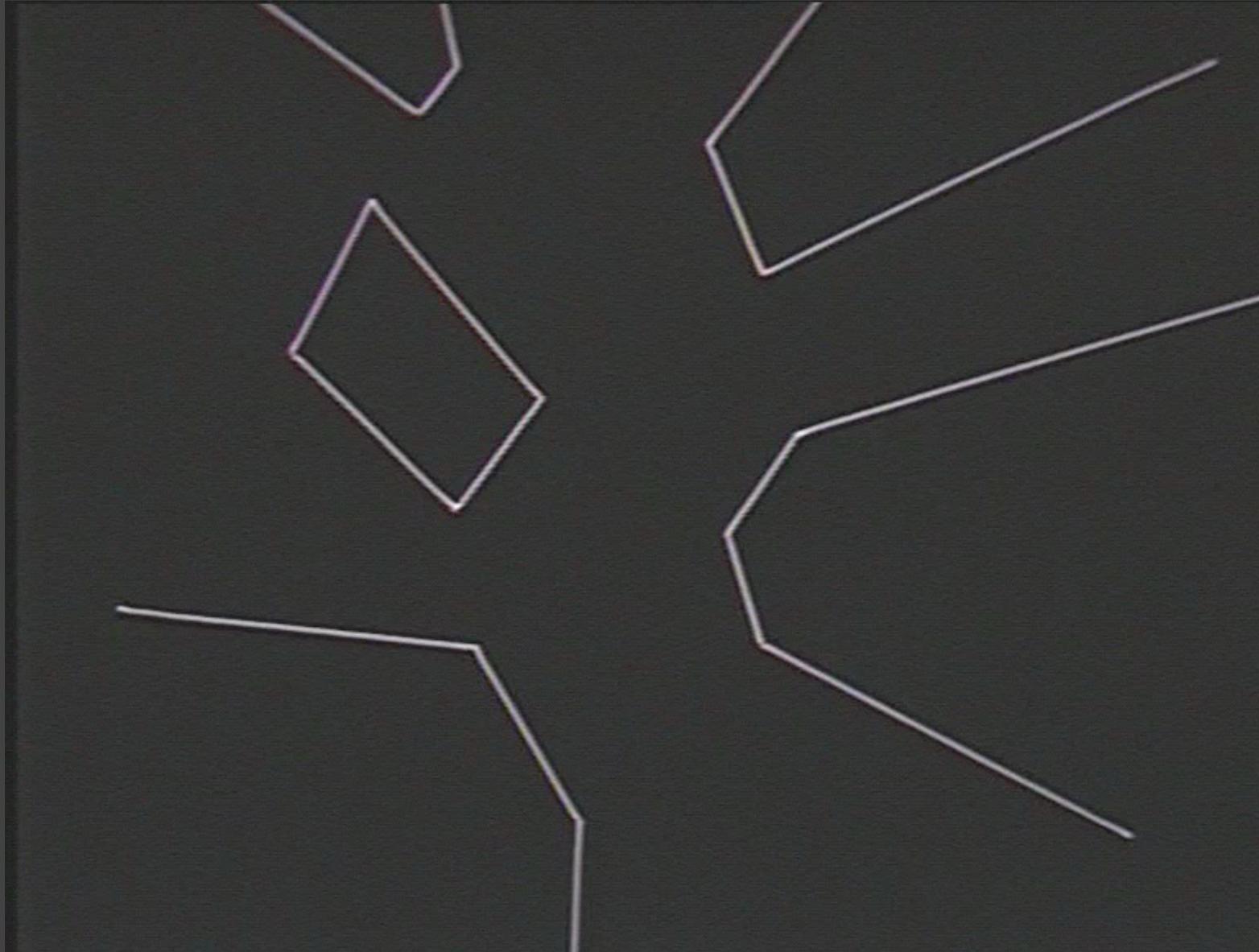
Si on veut donner une représentation  
"Méthode des éléments finis" >>> "Masses – Interactions"  
IL FAUT LA MODELISER

Si on veut donner une représentation  
"Méthode des éléments finis" >>> "Masses – Interactions"  
IL FAUT LA MODELISER Il ne suffit pas de faire du masses-ressorts sur maillage

# Processus de modélisation – CONCLUSION

**La modélisation physique (Physis)**  
**A partir d'un formalisme (Mathématé)**  
**Et quel que soit celui adopté**  
(Physique du point – Physique du solide)  
**est une science expérimentale**

# Processus de modélisation – CONCLUSION



Mais (1) qu'est ce qu'un modèle ?

Et (2) qu'est ce qu'un processus de modélisation ?

## ... et Modèle ? *Modèle X de Y pour Z*

### 1. Modélisation de phénomène de la nature: « PHYSIS » = Nature (Etant donné)

- Désigne le phénomène à modéliser
- *Optique géométrique, optique physique, etc.*  
*X: géométrique, physique ... De Y: Optique*

### 2. Comme système formel de représentation du mouvement (de quelque chose qui évolue dans le temps), *de tout type de mouvement, observé ou observable: une « MATHEMATE »*

- Qualifie la méthode
- *Exemples: modèle physique d'évolution de la monnaie en bourse, De déformation, de trafic autoroutier, d'une vibration sonore*

1. *La science physique : X quelconque, Y phénomène naturel*
2. *Autres usages : X physique, Y quelconque*

## ... et Modèle ? *Modèle X de Y pour Z*

1. *La science physique : X quelconque, Y phénomène naturel*
2. ....

### 1. Le modèle pour le physicien

Physis: Nature

Physique : science physique

Etude des phénomènes de la nature

Utilise plusieurs types de modèles

et développe les façons de passe de l'un à l'autre:

Les modèles doivent être compatibles

*Exemple: Optique géométrique, optique physique, etc.*

*X: géométrique, physique ... De Y: Optique*

1. ....
2. *Autres usages : X physique, Y quelconque*

## ... et Modèle ? *Modèle X de Y pour Z*

Mathématé - > Notion de Modeleur « système de modélisation » vocabulaire + syntaxe

Modeleur géométrique: opérateurs de la géométrie

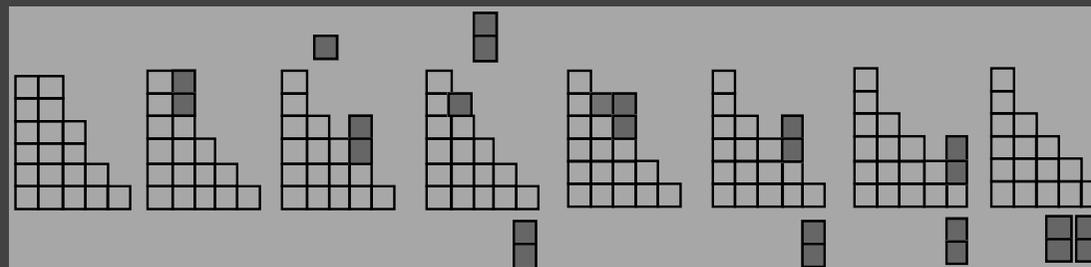
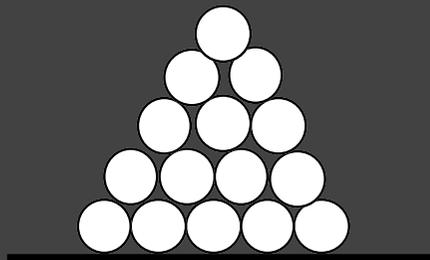
[Point, ligne, etc.] [distance, produit scalaire, etc.]

Exemple: modèle géométrique de tas de sable,  
modèle géométrique de l'optique,  
modèle géométrique de déformations

Modeleur logique: opérateurs de la logique

Prédicats

Exemple: modèle logique de tas de sable (jeu de Tetris)



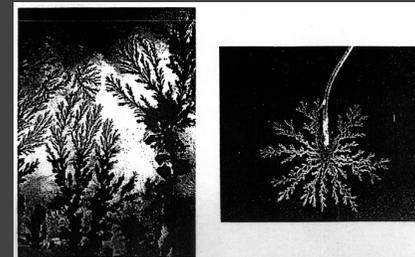
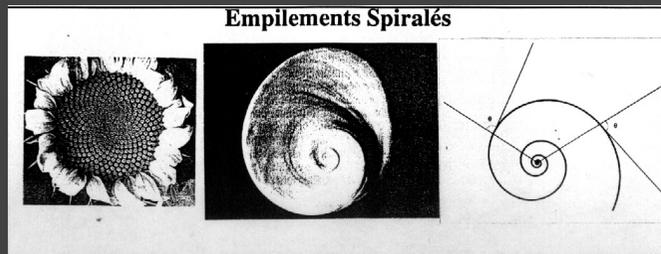
## ... et Modèle ? *Modèle X de Y pour Z*

Mathémate - > Notion de Modeleur « système de modélisation » vocabulaire + syntaxe

Modeleur arithmétique

[Nombres, suites, combinatoire, +, \*]

Ex: Suite de Fibonacci pour une arborescence minérale ou physique



Modeleur génétique : [mots] [croisement, duplication, etc.]

Ex: Optimisation paramètres fluides turbulents

Modeleur physique

[Principe de moindre action] ou [ Principe action - réaction]

•• *Il n'y a pas de modèle prédéterminé*

## ... et Modèle ? *Modèle X de Y pour Z*

Mathématisé - > Notion de Modeleur « système de modélisation » vocabulaire + syntaxe

•• *Il n'y a pas de modèle prédéterminé*

Pour Pythagore: tout est nombre

Pour Einstein: tout est géométrie

Pour Bohr: tout est probabilité

Pour la suite de ce cours ? : tout (presque) sera physique

**MERCI**