Université Mohammed Khider-BISKRA

Faculté des Sciences Exactes et la nature et de la vie

Département d'informatique

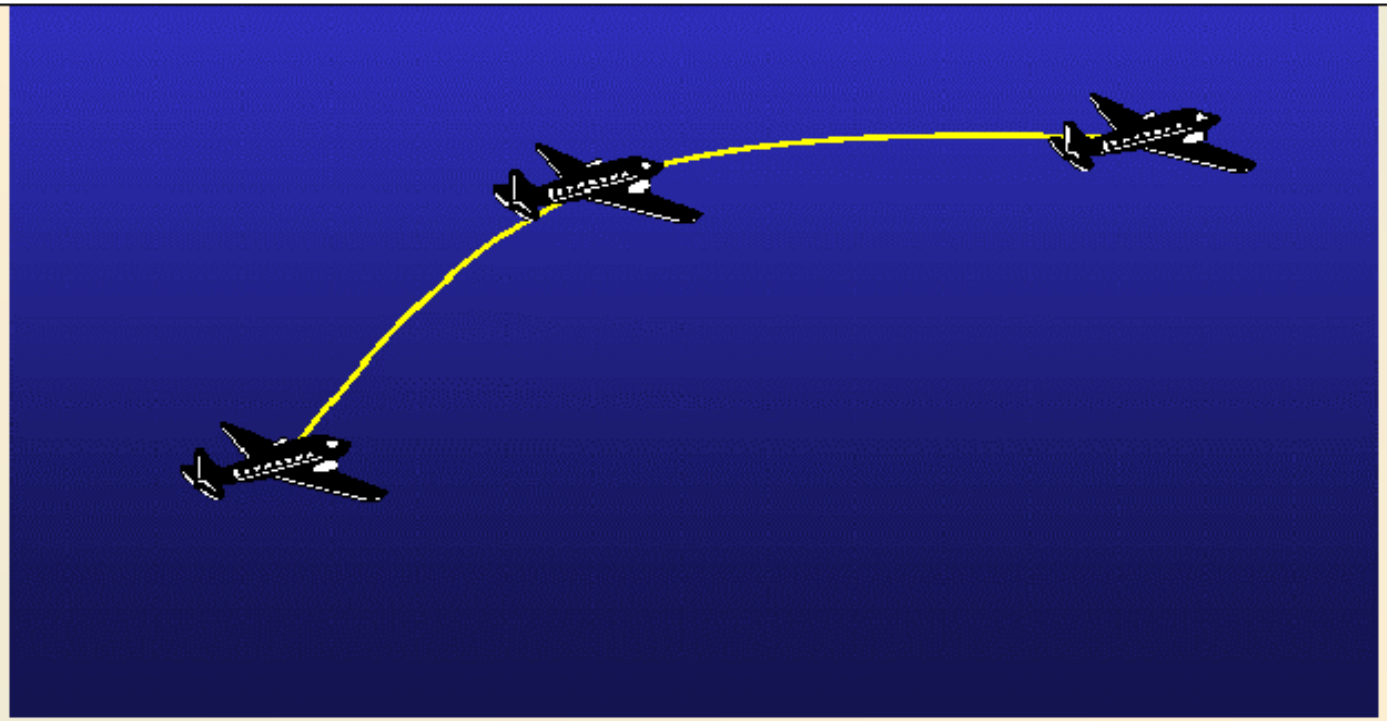
Cours de Master 1
Image et Vie Artificielle (IVA)

Module :

Animation par ordinateur (2025)

Pr. CHERIF Foudil

Animation par scènes ou images clés

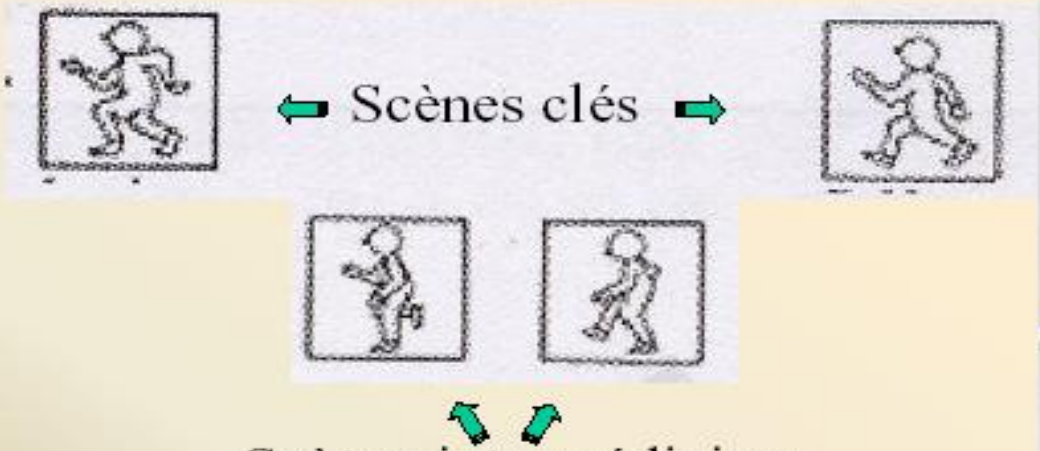


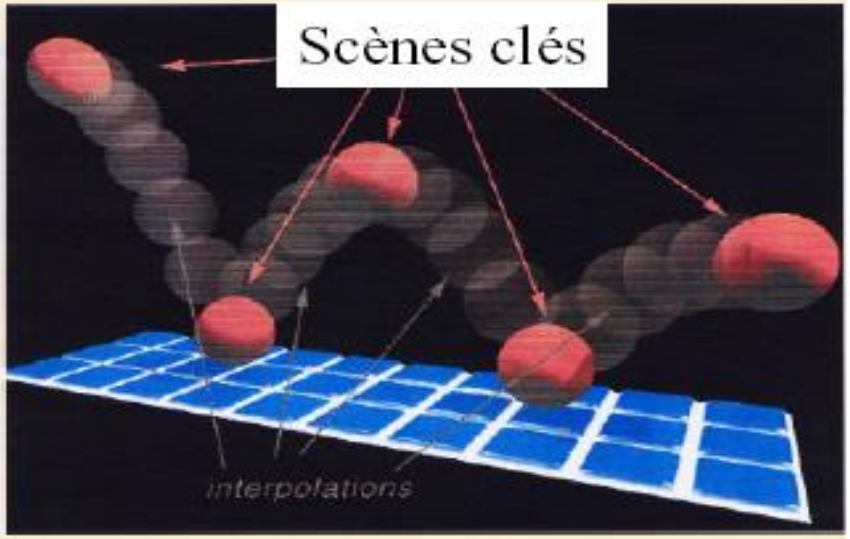
Interpolation de formes ou d'images

Origine de l'animation par scènes clés

- Tire son nom du système traditionnel de production développé par Walt Disney.

Dans ce système, les artistes principaux ne produisaient que les scènes les plus importantes; ensuite, les assistants dessinaient les scènes intermédiaires.





- Avec l'animation par scènes clés sur ordinateur, c'est l'utilisateur qui fait office d'animateur principal et le programme d'animation, celui d'assistant.

Principe d'Interpolation entre images-clé

Une image clé est définie par la position particulière d'un objet 3D dans le temps et par tous les paramètres ou attributs qui lui sont associés.

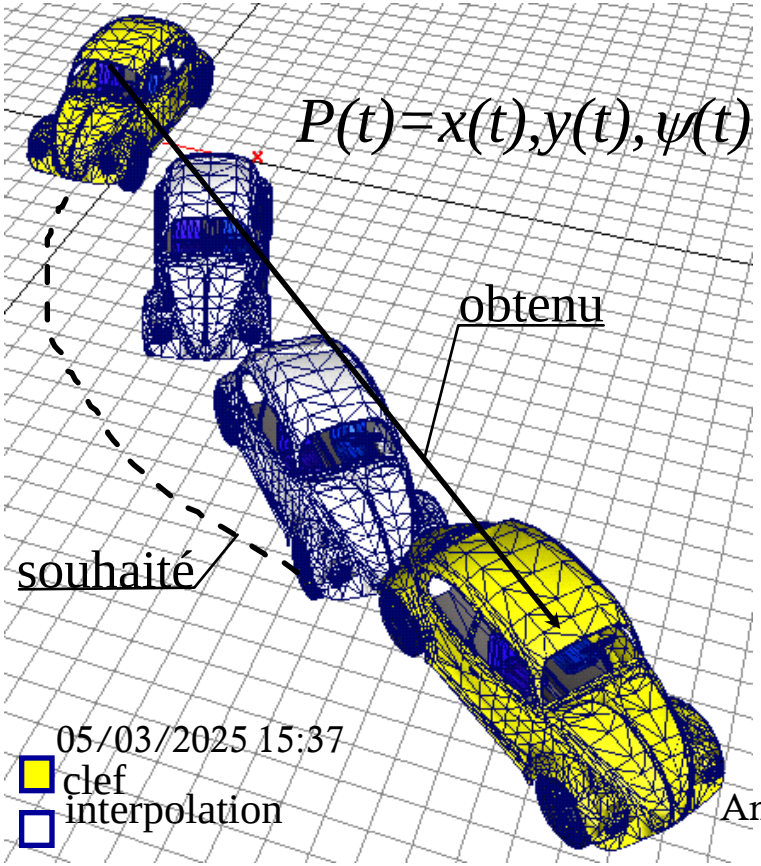
Ces paramètres peuvent être, par exemple,

- la forme (aplatissement, étirement, etc.),
- la texture (transformation du verre en marbre) et la couleur (passer du vert au bleu) d'un objet ;
- ou bien la position, la focale et le zoom de la caméra ; ou encore la position, l'intensité et la couleur des sources lumineuses, etc.

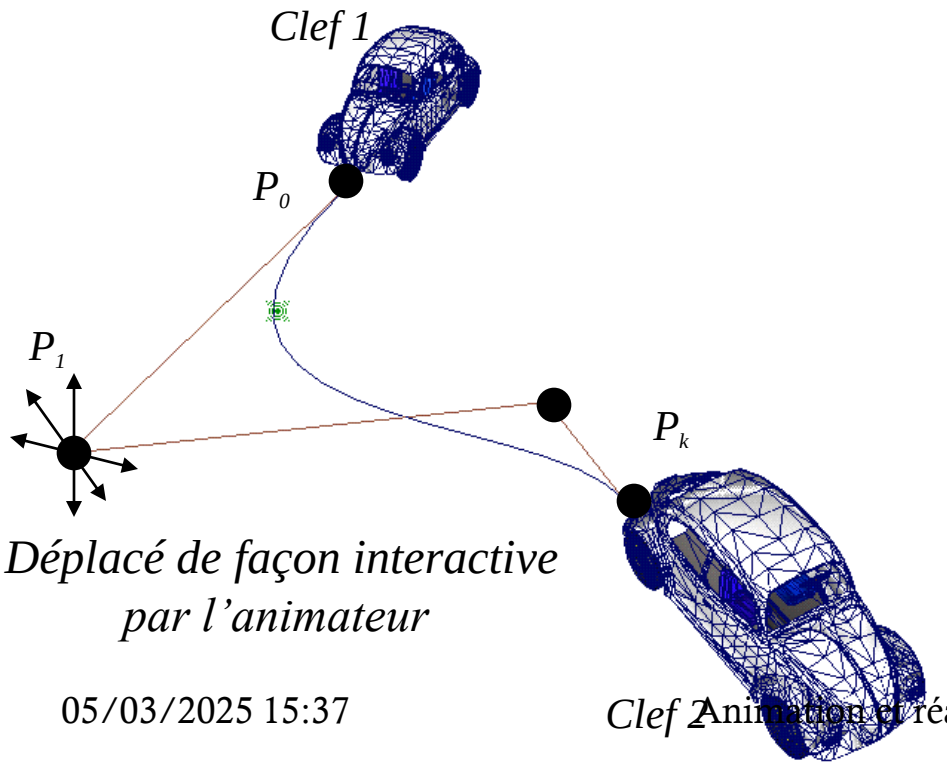
Les changements de tous ces paramètres sont définis sous forme de valeurs numériques dans les images clés et, par conséquent, ils sont également calculés par interpolation.

L'interpolation est une façon simple mais puissante de contrôler la vitesse et les changements de paramètres ou d'attributs entre deux images clés.

Interpolation entre images-clefs



Interpolation entre images-clefs



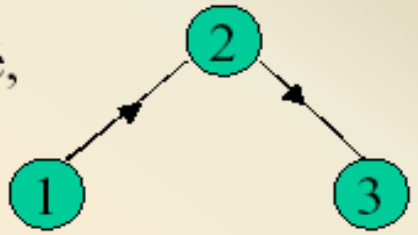
Déplacé de façon interactive par l'animateur

Différentes approches d'interpolation

Interpolation linéaire

- Possibilités d'animation trop restreintes.
- Trajectoires souvent non réalistes, manque de fluidité, discontinuités temporelles.

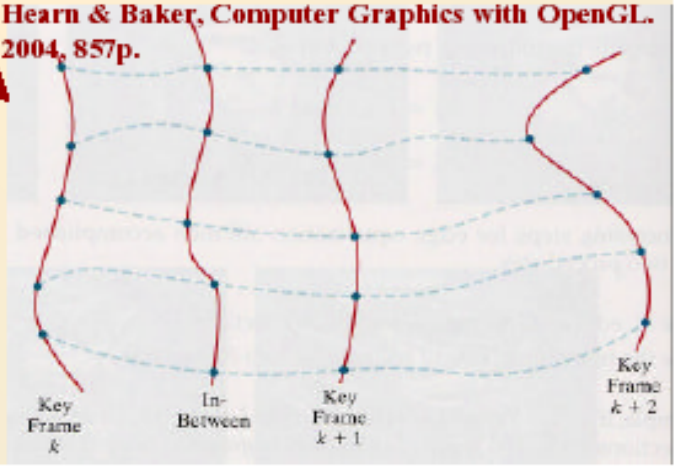
Exemple : Balle bondissante



Interpolation non linéaire

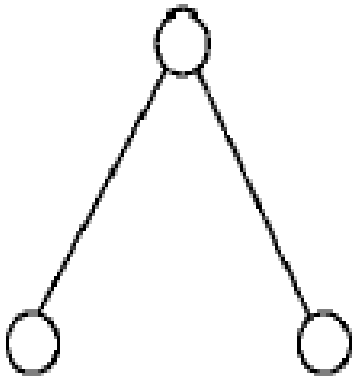
- On peut tenir compte de plusieurs scènes clés (au lieu des 2 directement touchées) pour spécifier les caractéristiques du mouvement entre 2 positions clés.
  Ex. : utilisation de B-Splines.

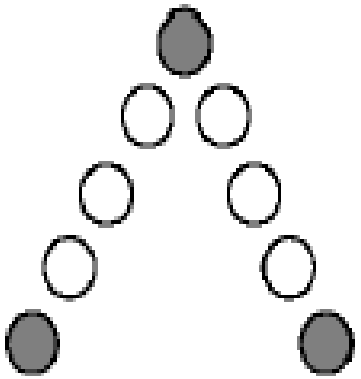
- Mouvement toujours non réaliste à moins de tenir compte de la vitesse et de l'accélération entre les scènes clés.



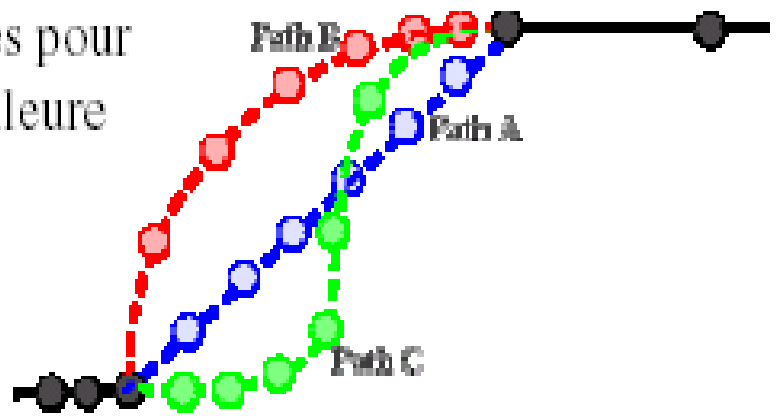
Interpolation linéaire et non linéaire

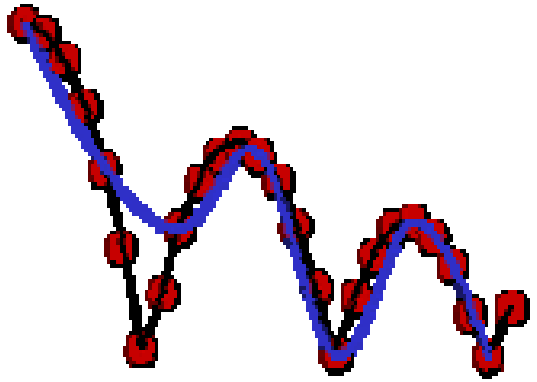
L'interpolation linéaire n'est forcément la meilleure (exemple avec la trajectoire d'une balle).





Il existe d'autres types de courbes et modèles pour effectuer une meilleure interpolation.



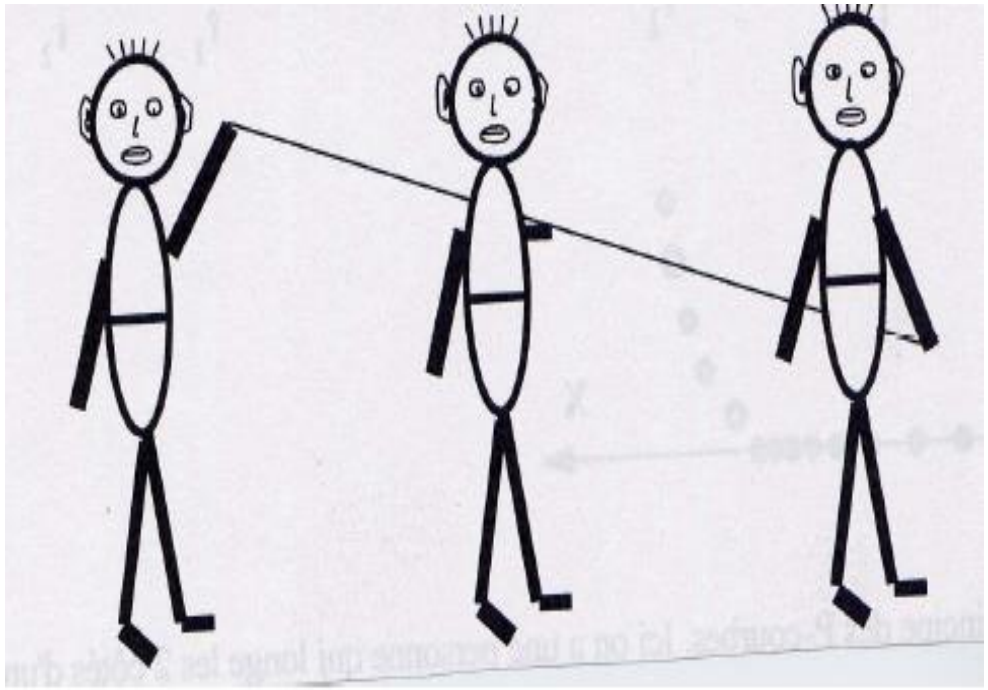


Synthèse d'Images par Ordinateur 11

Inconvénients

L'interpolation linéaire peut provoquer des effets indésirables :

- manque de fluidité dans le mouvement
- discontinuités dans la vitesse du mouvement
- distorsions dans les rotations



Images provenant de MIRALab, Université de Genève.

Exemple

- exemple: articulation de bras de robot caractérisée par angle α variant au cours du temps t
- on fixe les valeurs suivantes:
- t=0 α=10
- t=2 α=20
- t=5 α=45
- t=8 α=100

exemple de valeur interpolée: t=1/25,=>α=10+(20-10)/(2*25)= 10.2

- Trouver la fonction d'interpolation
- Calculer α pour t=28/25

Avantages et inconvénients de l'animation par images-clés

- Fondamental à la plupart des systèmes d'animation.
  - seulement approprié pour des mouvements simples de corps rigides, très difficile lorsque les modèles se complexifient
- Attention aux mouvements indésirables.
- Meilleures animations jusqu'à présent ont été réalisées avec un recours important aux *keyframes*.
- Exemple : les films d'animation chez Disney sont conçus en utilisant les *keyframes*.

3- Animation à base de scripts

- Un tel système se présente sous la forme d'un éditeur utilisant un langage de programmation spécialisé.
- L'animation est décrite à l'aide d'un algorithme.
- Ces langages spécialisés permettent de :
  - décrire les objets géométriques,
  - les conditions de visualisation,
  - l'animation d'une scène,
  - réaliser des bibliothèques d'objets et de mouvements.
- Ces systèmes ont diminué en popularité au profit des systèmes interactifs.

3- Animation à base de scripts

Exemple écrit en langage MIRA
développé par N. et D. Thalmann(85)

```
créer HORLOGE(. . .);
pour IMAGE := 1 a NB_IMAGES
        TEMPS := TEMPS + 1/25;
        ANGLE := A * SIN(OMEGA * TEMPS + PHI);
        MODIFIER(HORLOGE, ANGLE);
        dessiner HORLOGE;
        enregistrer l'image;
        effacer HORLOGE.
```

4- Animation Procédurale

Un modèle mathématique définit:

- la géométrie d'un objet
- sa durée de vie
- son mouvement
- son changement de forme…

Exemple: modélisation et animation d'objets flous (nuages, flammes, vagues, fumée,…)

4- Animation Procédurale

Principe

- **Le mouvement est décrit algorithmique**

Exemple

- **Un objet tombant en chute libre (h=100):**

$$y = 100 - g \cdot t^2 / 2$$

<t,y>={<0,100>, <1,95>, <2,80>, <3,55>, <4,20>}

- **Pendule d'une horloge**

$$\alpha = A \sin(\omega \cdot t + \phi)$$

4- Animation Procédurale: exemple

Planche 13. Une plage au coucher du soleil. (Image fournie par Bill Reeves de Pixar, et Alan Fournier de l'Université de Toronto.)

4- Animation Procédurale: exemple

- **Exemple**: animation d'une horloge

```
créer HORLOGE(temps_inital,nb_images)
{
        pour image=1:nb_images {
                t=t+1/25;
                angle_h=180*sin(2*pi*F_h*t);
                angle_mn=180*sin(2*pi*F_mn*t);
                angles_sec=180*sin(2*pi*Fs*t);
                appliquerRotation(«petite»,angle_h);
                appliquerRotation(«grande»,angle_mn);
                appliquerRotation(«troteuse»,angle_sec);
                dessiner(HORLOGE);
        }
}
```

4- Animation Procédurale: exemple

```
créer OBJET (...);
TEMPS = 0;
tantque  Y > 0
        Y = 100 - 5*TEMPS^2
        deplacer (OBJET, X,Y,Z);
        dessiner OBJET;
        enregistrer l'image
        effacer OBJET
        TEMPS:=TEMPS+1/25;
```

4- Animation Procédurale: pendule d'une horloge

$$\alpha = A \sin(\omega t + \phi)$$

Donc la programmation d'une animation typique peut être de la forme suivante:

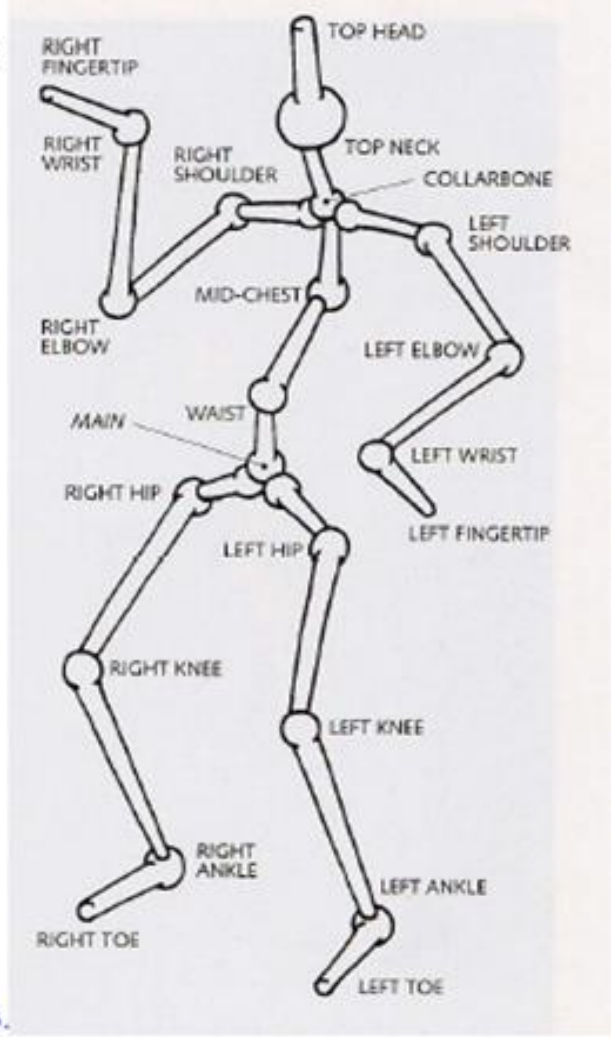
```
créer HORLOGE (...);
pour IMAGE:=1 a NB_IMAGES
    TEMPS:=TEMPS+1/25;
    ANGLE:=A*SIN (OMEGA*TEMPS+PHI);
    MODIFIER (HORLOGE, ANGLE);
    dessiner HORLOGE;
    enregistre r l'image
    effacer HORLOGE
```

5- Animation avec liens hiérarchiques

- Cela touche l'animation de structures articulées représentées par des arborescences.
- Un lien parent-enfant désigne le fait qu'un objet contrôle un ou plusieurs autres objets et non l'inverse.

Exemple :

Les doigts se déplacent avec la main qui se déplace avec le poignet, etc.



Tiré de Isaac Victor Kerlow, The art of 3-D computer animation and imaging. Wiley, 2000, p. 333.

6-L'animation de caméras et de lumières(1)

Une scène d'animation est vue de différentes façons et cela dépend de:

- la position de l'observateur,
- de la direction de vision
- et de l'angle de vue.

➔ Ces paramètres sont regroupés dans le concept de la **caméra virtuelle** ou **synthétique**

Une **caméra virtuelle** est caractérisée par au minimum deux paramètres:

- **L'œi**l: est un point et représente la position de la caméra;
- **le point d'intérêt:** est le point vers lequel la caméra est dirigée.
- **Un angle de vue:** peut aussi être défini pour contrôler l'ouverture de la vision sur la scène.

6-L'animation de caméras et de lumières(2)

Un des effets les plus spectaculaires de l'animation 3D consiste à se promener **à l'intérieur** d'une scène donnée. Ces effets sont en fait faciles à produire en animant les caractéristiques de la caméra virtuelle.

L'utilisation de plusieurs caméras permet la simulation d'effets spéciaux;

Définition *: (Les **effets spéciaux** ou **trucages** sont des techniques utilisées au cinéma pour créer l'illusion de certaines actions et simuler des objets, des personnages ou des phénomènes qui n'existent pas ou ne peuvent pas être filmés au moment du tournage)*

6- L'animation de caméras et de lumières(3)

- Une scène doit aussi recevoir de la **lumière** pour être réaliste.
- Les lumières synthétiques ont des caractéristiques et celles-ci peuvent évoluer au cours du temps. En particulier, les intensités et les positions des sources de lumière
- Par exemple, nous pouvons définir une source de lumière positionnelle et supposer que l'intensité de la source passe du rouge au vert tandis que la position change selon un mouvement oscillatoire.

Introduction aux corps articulés et aux acteurs de synthèse

7- Introduction aux corps articulés et aux acteurs de synthèse

- La recherche dans le domaine de l'animation par ordinateur évolue de plus en plus vers l'animation de scènes comportant des êtres humains **conscients de leur environnement**.
- Ce type d'animation est **pluridisciplinaire:**
- doit intégrer certains aspects et méthodes spécifiques à:
  - l'animation,
  - la mécanique,
  - la robotique,
  - la physiologie,
  - la psychologie et
  - l'intelligence artificielle.

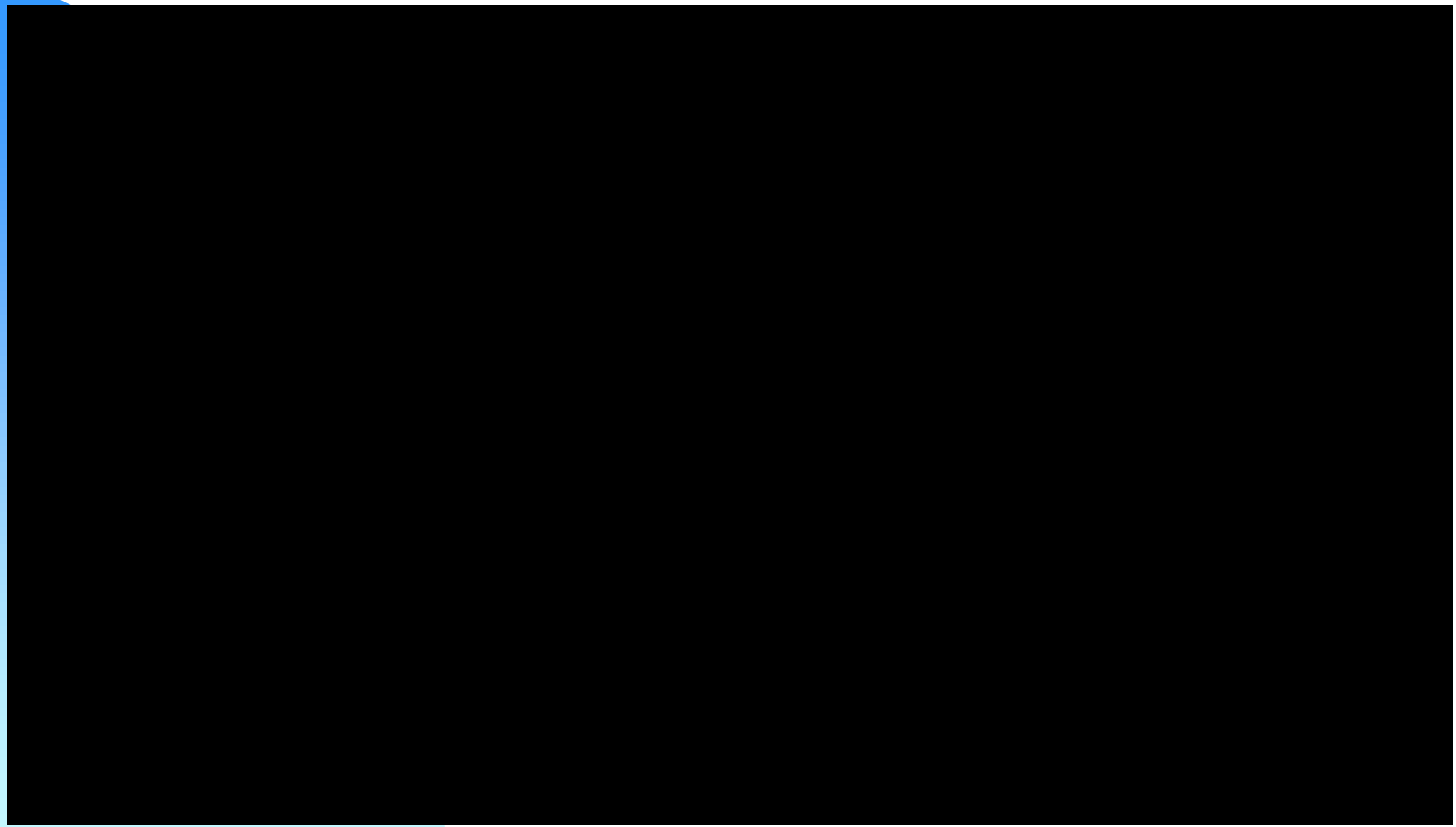
Quel est le type de cette d'animation ?

Réponse : Animation image par image

- Voir le fichier pdf : technique

- L'animation de personnages en pâte à modeler

Quel est le type d’animation ?



Animation image par image : stop motion

- Un site intéressant:
- http://formation.crdp-strasbourg.fr/animation.php
- Les logiciels:
- https://all3dp.com/fr/1/meilleur-logiciel-animation-3d-software/

7- Introduction aux corps articulés et aux acteurs de synthèse

- Pour créer des mouvements humains raisonnablement naturels, il faut tenir compte à la fois du contexte géométrique, physique et comportemental.
- Aucun système uniquement basé sur un de ces trois aspects ne peut donner de bons résultats.
- L'animation d'un acteur synthétique peut être subdivisée en deux parties: l'animation du corps et celle du visage,
- L'animation du corps repose principalement sur des **degrés de liberté** (**DOF)** (angles) tandis que l'animation faciale est de nature musculaire

Animation de corps articulés

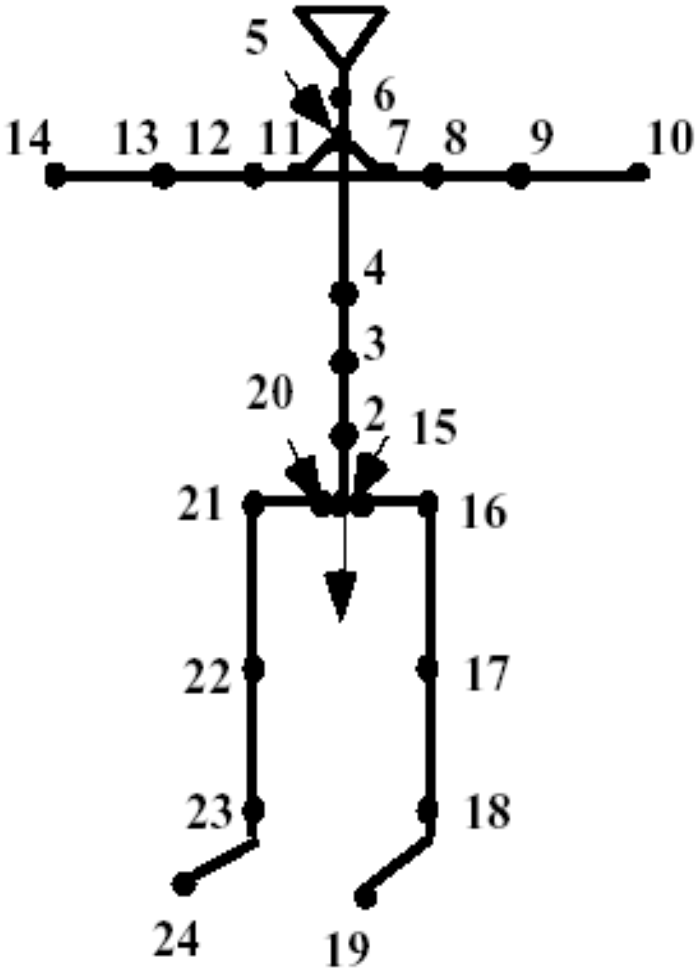
- Personnages, humains, animaux, robots
- Caractérisés par une structure hiérarchique: **le squelette**
- **squelette:** ensemble de segments connectés, correspondant aux membres et articulations
- **articulations**: intersection de deux segments

  => point du squelette où un membre attaché à

  ce point peut bouger.
- **Angle entre deux segments**: angle d'articulation
- L'animation d'un squelette consiste à animer les angles d'articulation ou La position et l'orientation globale,
- On observe 2 tendances:
  - 1) mouvement est produit "à la main": capture de mouvement, positions-clés
  - 2) contrôle automatique du mouvement
  - La première approche est plus populaire pour la production de films par ordinateur.

Squelette en fil de fer avec les articulations

Nom	Nombre	Angles
VERTEBRE 1	2	FTP
VERTEBRE 2	3	FTP
VERTEBRE 3	4	FTP
VERTEBRE 4	5	FTP
VERTEBRE 5	6	FTP
CLAVICULE GAUCHE	7	FP
CLAVICULE DROITE	11	FP
EPAULE GAUCHE	8	FTP
EPAULE DROITE	12	FTP
COUDE GAUCHE	9	FT
COUDE DROIT	13	FT
POIGNET GAUCHE	10	FP
POIGNET DROIT	14	FP
HANCHE GAUCHE	15	F
HANCHE DROITE	20	F
CUISSE GAUCHE	16	FTP
CUISSE DROITE	21	FTP
GENOU GAUCHE	17	F
GENOU DROITE	22	F
CHEVILLE GAUCHE	18	F
CHEVILLE DROITE	23	F
TALON GAUCHE	19	F
TALON DROIT	24	F



Représentation d'un humanoïde animable

- Corps humain: grand nombre d'os, de muscles, de tissus mous, de circuits de transfert d'informations:
- Compromis réalisme / temps réel est nécessaire
- Représentation simplifiée du corps humain en 03 couches:
  - 1- le squelette
  - 2- les muscles
  - 3- la peau

Représentation d'un humanoïde animable

1- **le squelette**

- Le squelette humain = +200 os reliés par des articulations et plus de 700 muscles
- Choix d'un os comme racine: squelette vu comme une arborescence
  - Os = segment
  - Articulation = nœud
- Animer un humanoïde = contrôler au cours du temps l'orientation des articulations

Représentation d'un humanoïde animable (le squelette)

Représentation simplifiée de HANIM (2001)

- Limitation du nombre d'articulation suffit à obtenir un niveau de détail suffisant du mouvement:
  - Ex: colonne vertébrale (24 ver.) discrétisée en 5 ou 6 articulations
- Simplification des articulations:
  - Supposée centre de rotation entre deux objets rigides articulés (1, 2 ou 3 DDL)

Représentation d'un humanoïde animable (le squelette)

- Racine de l'arbre :
  - Souvent le centre du bassin
  - En fonction du contexte d'animation, peut être modifiée: ex : personne en marche ou suspendue
- La représentation arborescente permet d'exprimer des couplages entre chaînes articulaires supposées indépendantes

Représentation d'un humanoïde animable (le squelette)

2- Les muscles et la peau

- Attachement des muscles au squelette
- Modèle purement géométrique: surfaces implicites…
- Modèles physiques : masse ressort ou éléments finis

- La représentation arborescente permet d'exprimer des couplages entre chaînes articulaires supposées indépendantes

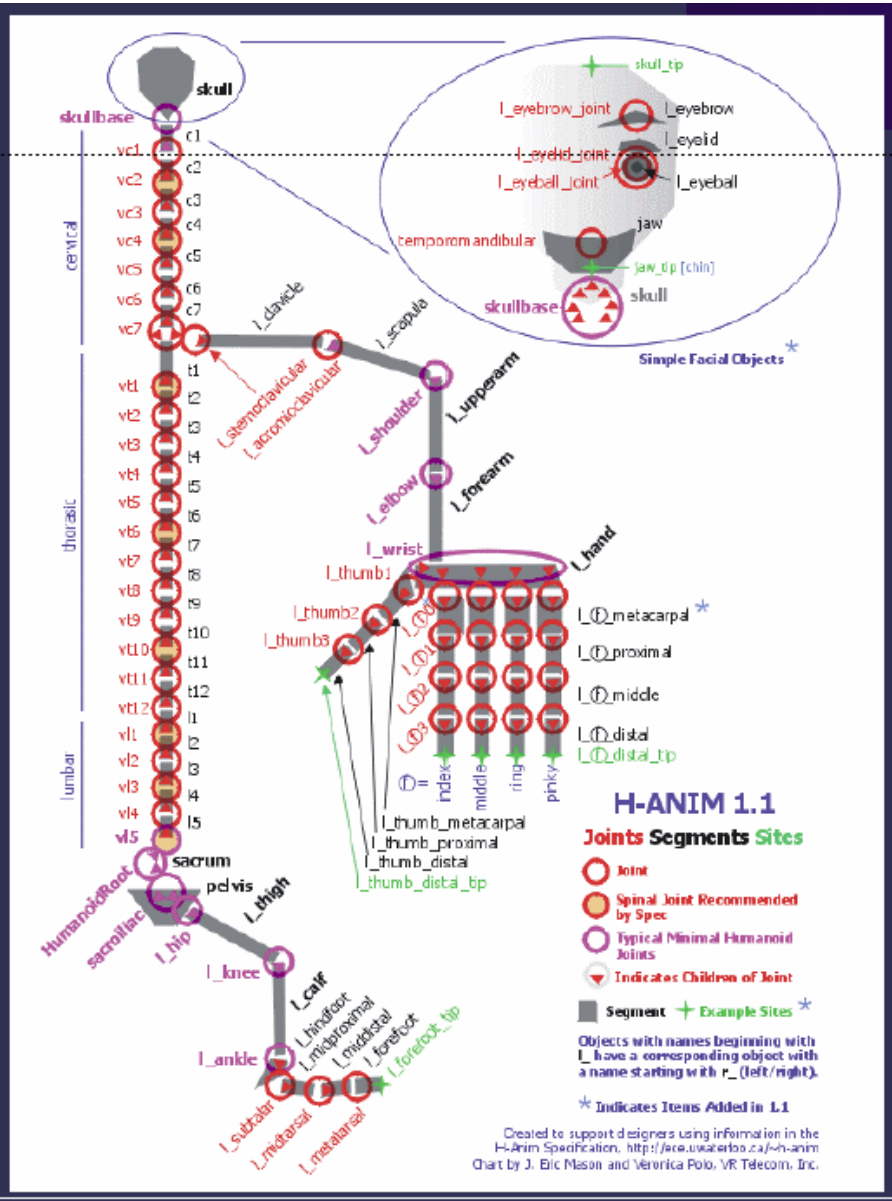
Représentation d'un humanoïde animable (le squelette)

3- la norme HANIM(2001)

- Représentation normalisée ISO issue de la réflexion des divers communautés scientifiques, biomécanique, animation par ordinateur,… (**www.h-anim.org**)
- Compatibilité au VRML97
- Permet de spécifier la morphologie d'un personnage virtuel sous forme arborescente
  - Hiérarchie d'articulations(joints), des segments= partie du corps rattachée à l'articulation, des sites(habits), accessoires rattachés à un segment,…
- Version 2.00x en cours

II – Représentation d'un humanoïde animable

Norme H-ANIM 1.1



Les 24 meilleurs logiciels d'animation 3D en 2019 (9 sont gratuits)

Logiciel	Application	Système d'exploitation	Prix sur le marché (€)
3ds Max	Capture de mouvement, keyframe	Windows	1920€ / an
Motionbuilder	Capture de mouvement, keyframe	Windows	1370€ / an
Blender	Capture de mouvement, keyframe	Windows, Mac, Linux	Gratuit
Cinema 4D	Capture de mouvement, keyframe	Windows, Mac	2975
Clara.io	Animation en keyframe	Navigateur Web	Gratuit
Daz3D	Capture de mouvement, keyframe	Navigateur Web	Gratuit
Faceshift	Capture de mouvement	Windows, Mac	390€ / an
Houdini Apprentice	Capture de mouvement, keyframe	Windows, Mac, Linux	Gratuit (fonctionnalités limitées)
iClone	Capture de mouvement, keyframe	Windows	160€
iPi Soft	Capture de mouvement	Windows	78€/an
MakeHuman	Capture de mouvement, keyframe	Windows, Mac, Linux	Gratuit
Maya	Capture de mouvement, keyframe	Windows, Mac, Linux	1920€ / an

Les 24 meilleurs logiciels d'animation 3D en 2019 (9 sont gratuits)

Mixamo	Capture de mouvement, keyframe	Navigateur Web	Variable
modo	Capture de mouvement, keyframe	Windows, Mac	1452
Poser	Capture de mouvement, keyframe	Windows, Mac	105€ (Standard), 285€ (Pro)
Terragen	Animation en keyframe	Windows, Mac, Linux	285€
SmartBody	Capture de mouvement	Windows, Linux, Mac, Android, iOS	Gratuit
Boats Animator	Animation en stop-motion	Windows, Mac, Linux	Gratuit
Dragonframe	Animation en stop-motion	Windows, Mac, Linux	240€ (USB), 265€ (sans fil)
Animate CC	Animation 2D	Windows, Mac	24,19€/mois
Animation Paper	Animation 2D	Windows, Mac	65€
Moho	Animation 2D	Windows, Mac	326€
Pencil2D	Animation 2D	Windows, Mac, Linux	Gratuit
Synfig Studio	Animation 2D	Windows, Mac, Linux	Gratuit

Les 24 meilleurs logiciels d'animation 3D en 2019 (9 sont gratuits)

- **Description du logiciel d'animation 3D :** 3ds Max est l'une des suites logicielles d'animation 3D payantes les plus reconnues actuellement disponible. Ses nombreuses fonctionnalités font du logiciel un outil populaire pour le développement de jeux vidéo, la création d'effets visuels et la visualisation architecturale. 3d Max permet entre autres la simulation de particules et de lumière, dispose d'un moteur de simulation de tissus et de son propre langage de script (MAXScript).

Les 24 meilleurs logiciels d'animation 3D en 2019 (9 sont gratuits)

- **Description du logiciel d'animation 3D :** Motionbuilder est un logiciel d'animation 3D développé par Autodesk pour les professionnels de l'animation. Ce programme combine l'animation en keyframe avec la capture de mouvement et la production virtuelle. Avec ce outil, vous serez capable d'animer en temps réel des personnages 3D spécialement conçus pour les jeux vidéos et les films d'animation.

Les 24 meilleurs logiciels d’animation 3D en 2019 (9 sont gratuits)

- **Description du logiciel d’animation 3D :** Blender est un logiciel professionnel d’animation 3D et de modélisation 3D gratuit et open source, avec lequel vous pouvez créer des films d’animation, des effets visuels, des applications interactives, des jeux vidéo et des visualisations architecturales. Blender dispose de fonctionnalités très diversifiées : modélisation 3D, mapping UV, texturing, édition d’image matricielle, squelettage (ou rigging) et skinning, simulation de liquides et de fumées, simulation de particules, simulation de corps mou, sculpture, animation, match moving, suivi du mouvement de la caméra, rendering, montage et compositing vidéo, sans oublier un moteur de jeu intégré.

Contrôle automatique du mouvement

On relève cinq étapes pour parvenir à un contrôle automatique:

- 1- Cinématique directe et inverse
- 2- Dynamique
- 3- Interaction avec l'environnement
- 4- Animation de niveau tâche
- 5- Animation comportementale et acteurs autonomes

Cinématique

Étude du mouvement indépendamment des forces qui produisent ce mouvement

Propriétés du mouvement reliées au temps et à la géométrie

- - Position
- - Direction
- - Vitesse
- - Accéleration

Cinématique

- **1- Cinématique directe**
- Méthodes efficaces et numériquement valables
  - Trouver la position et l'orientation d'une extrémité :
    - Par rapport à un système de référence
    - En fonction du temps
    - Sans tenir compte des force et des moments en jeu
  - Correspond à résoudre l'équation x = f(q)
- Interactif, grande liberté de contrôle et simplicité
- Exemple dans 3ds max : interface graphique permet de visualiser et de modifier la valeur des articulation d'un squelette.
- Mais devient difficile à contrôler quand le nombre de points augmente

Contrôle de cinématique directe

- Dans une animation simple, un animateur peut déterminer interactivement des positions clés puis interpoler les valeurs des paramètres d'articulation.
- Le positionnement d'un objet articulé en spécifiant tous les paramètres d'articulation s'appelle un contrôle cinématique direct.
- Mais, placer un objet articulé dans une position finale souhaitée en spécifiant les paramètres d'articulation peut être une opération laborieuse pour l'utilisateur. ⟹ C'est souvent un processus par essais et erreurs.
- Pour éviter ces difficultés, un contrôle cinématique inverse est parfois utilisé.

  ⇓

  La position et l'orientation souhaitées de l'effecteur final sont données, et les paramètres d'articulation internes sont calculés automatiquement.

41

Cinématique

2- Cinématique inverse

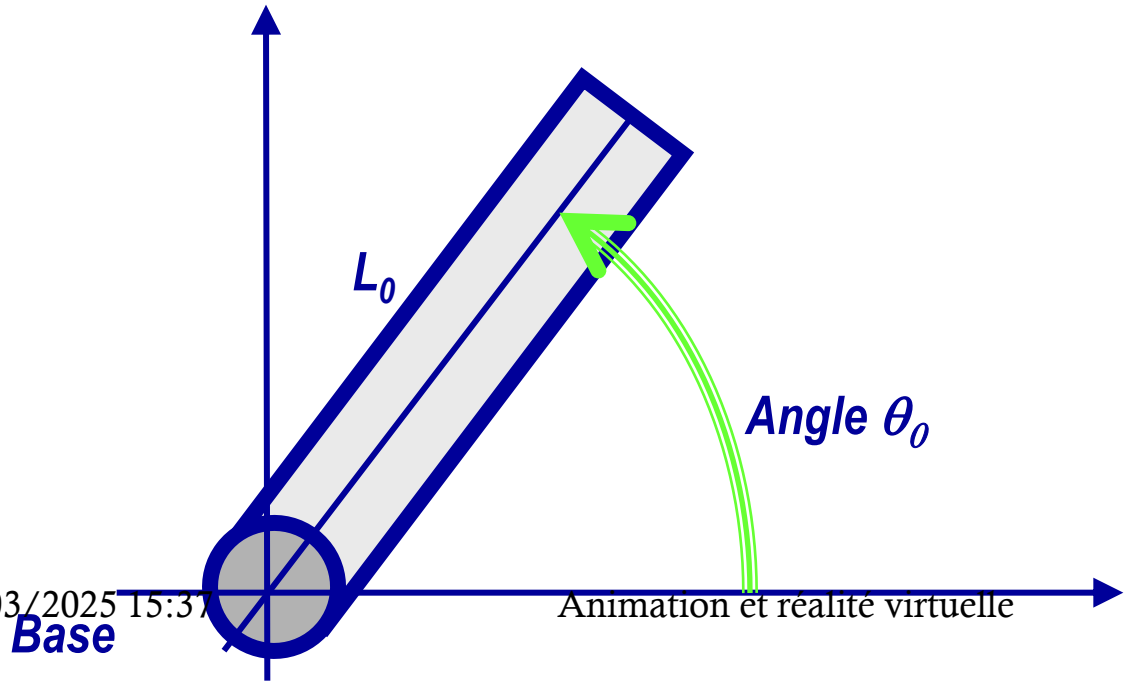
- Commandes de haut niveau
- Automatique, Calcul des mouvements pour atteindre un point donné
- Solution difficile à calculer si on augment la complexité (nombre de points et de degré sur chaque joint)
- Difficile de calculer un mouvement qui semble naturel

Représentation cinématique

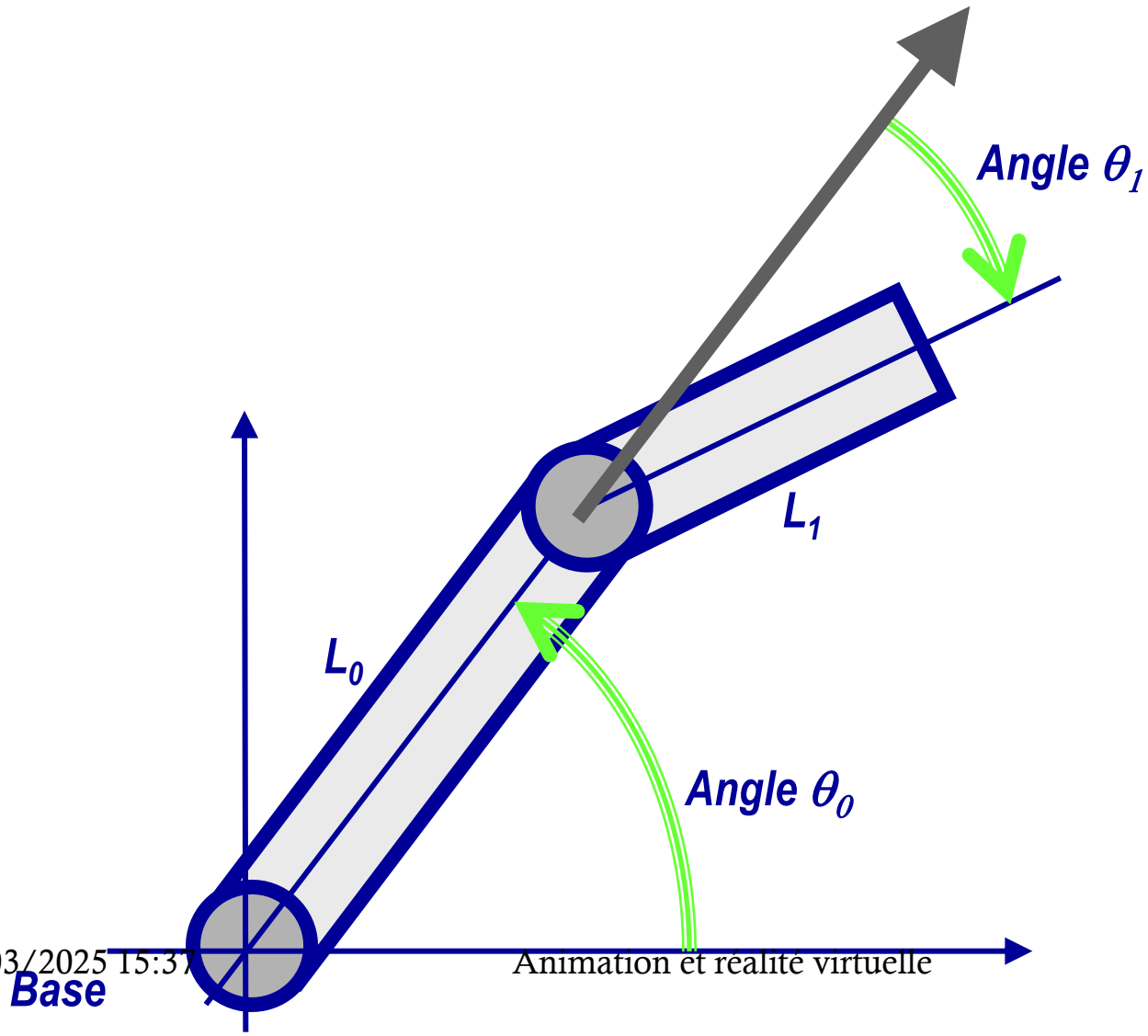
- Chaîne cinématique
  - Ensemble de transformations

- Transformations locales
  - Mouvement d'une partie du corps entraîne le déplacement des parties "filles"
  - Définition d'une hiérarchie
  - Présence d'une racine (root)

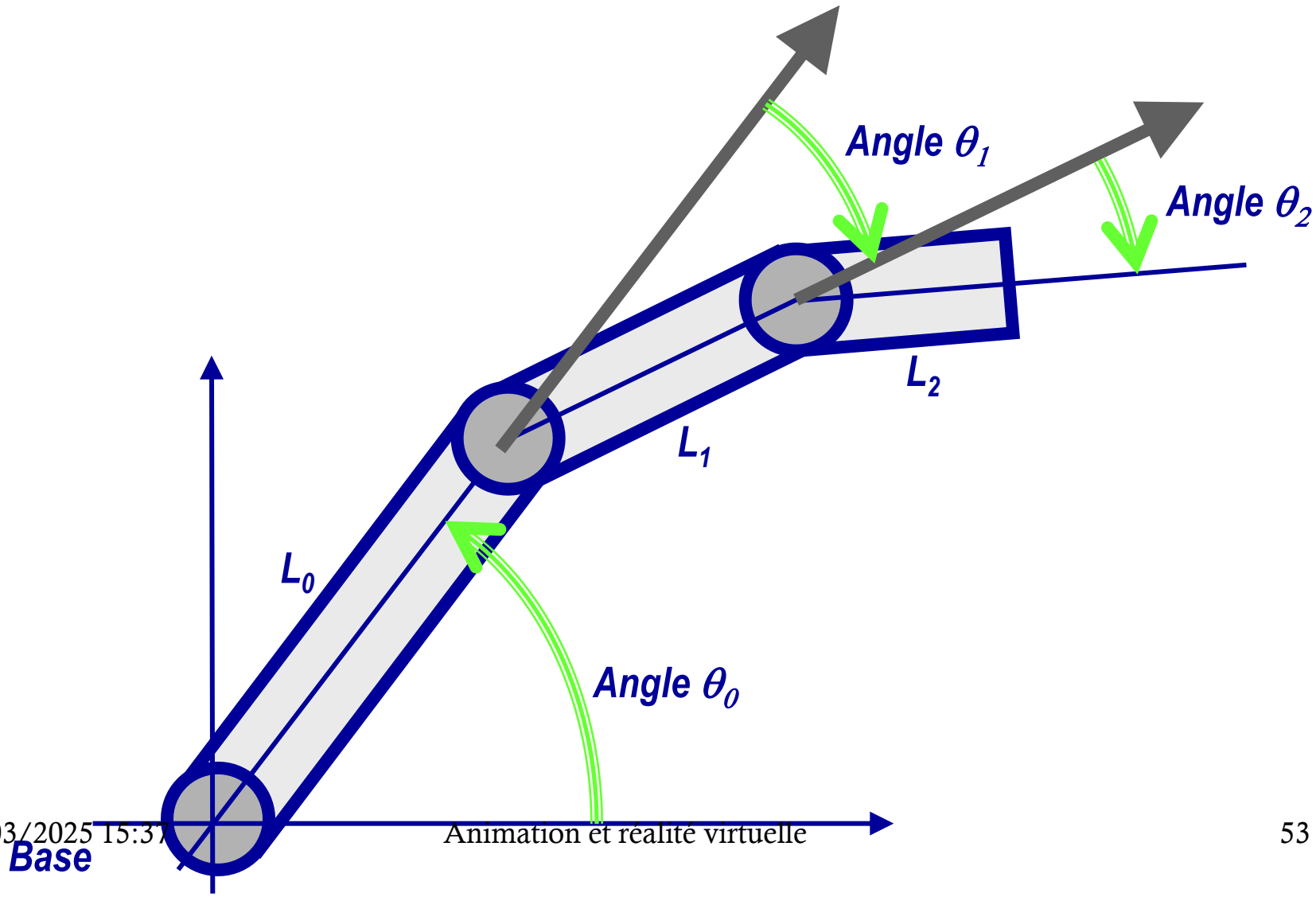
Premier segment



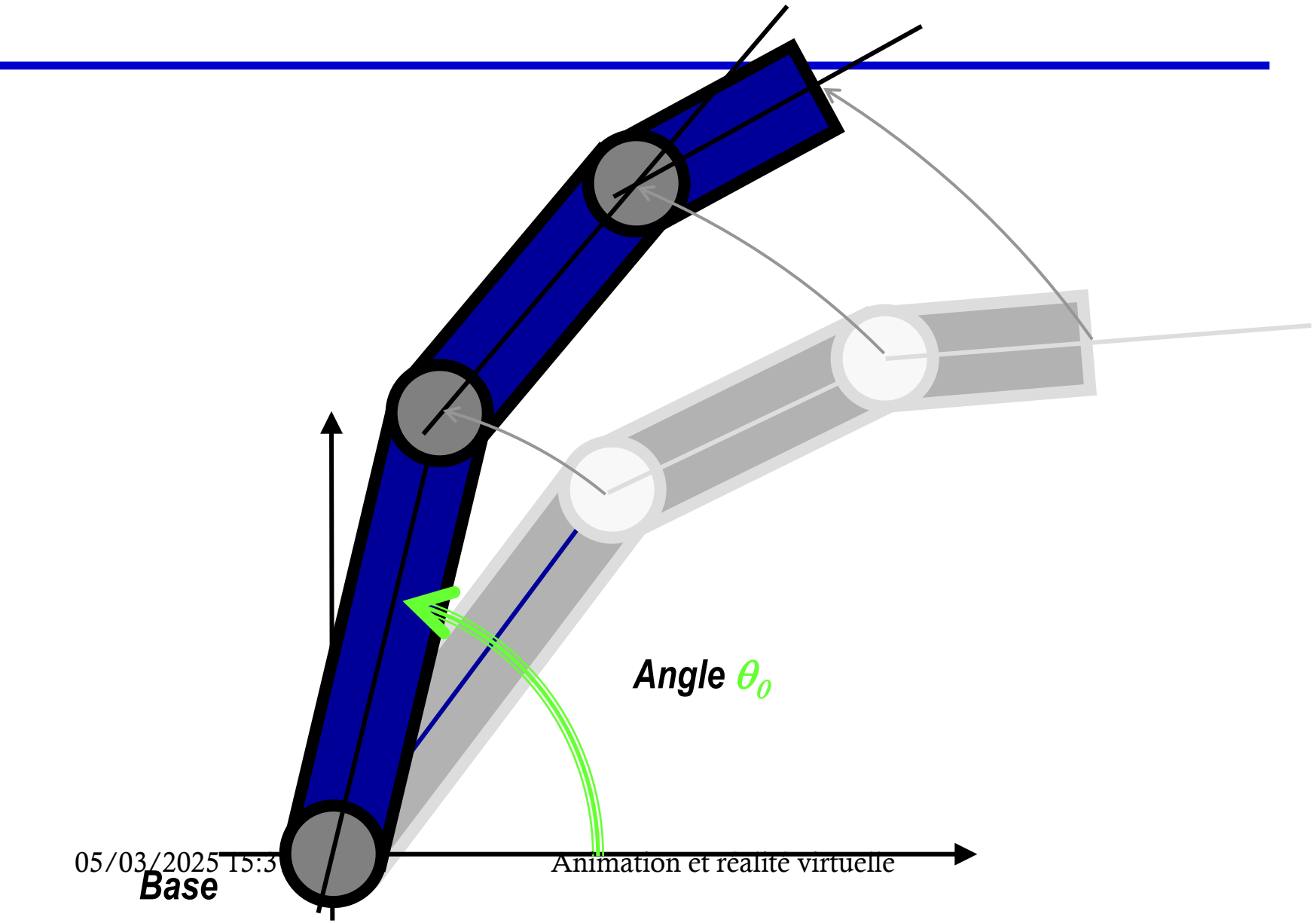
Second segment



Troisième segment



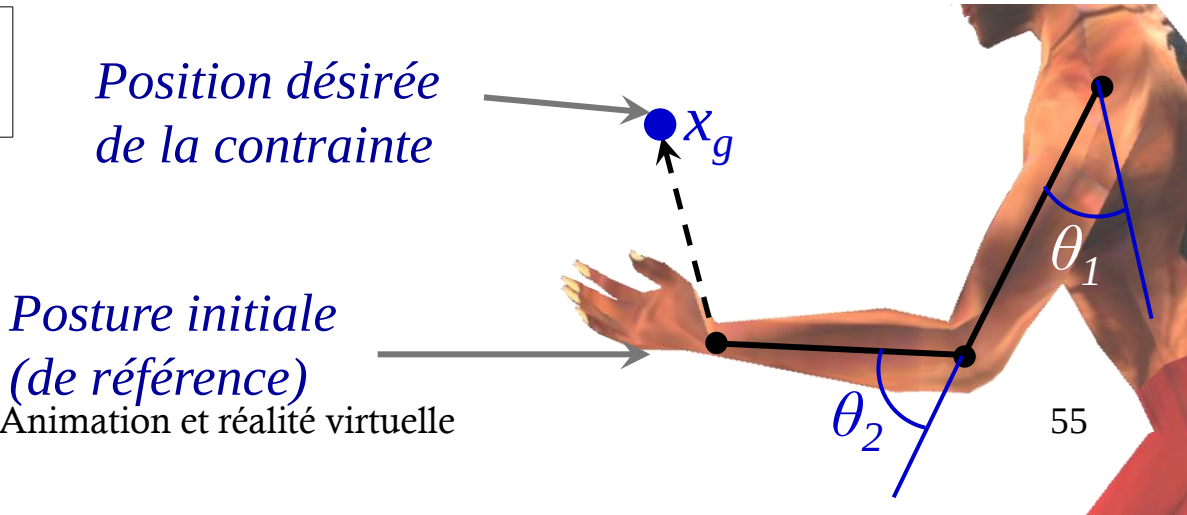
Variation de l'angle θ_0



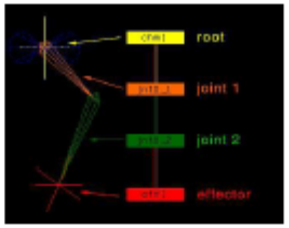
Cinématique directe / inverse

- Cinématique directe
  - Détermination de la position en fonction des angles

- Cinématique inverse
  - Détermination des angles en fonction des contraintes



Chaînes



Racine
Point de départ de la chaîne.

Os Ligne droite qui connecte deux joints

Joint
Point de rotation entre deux os. Un joint peut être 2D ou 3D.

Point de contrôle (effector)
Placé au bout de la chaîne, permet d'invoquer la cinématique inverse.

4

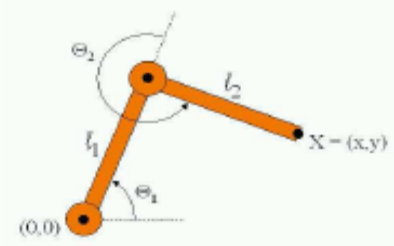
Contrôle d'une chaîne

Cinématique directe (forward kinematics)
On spécifie directement l'angle de chaque joint de la chaîne

Cinématique inverse (inverse kinematics)
On spécifie la position du bout de la chaîne (effector) et on calcule automatique les angles des joints

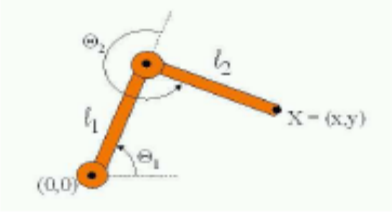
5

Exemple de chaîne



- $(0,0)$ est la racine
- l_1 et l_2 sont les os
- X est le bout (effector)
- Θ_1 et Θ_2 sont les angles des joints

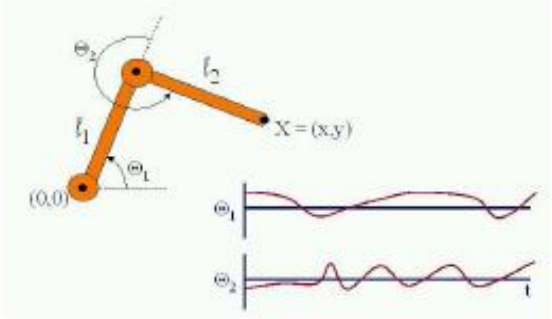
Cinématique directe



- On spécifie directement Θ_1 et Θ_2
- Ensuite on calcule X

Cinématique directe

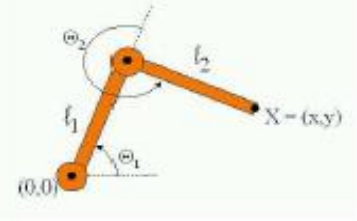
On peut animer les deux paramètres Θ_1 et Θ_2 par des courbes d'interpolation



8

Cinématique directe

On peut aussi spécifier des valeurs de départ et des vitesses



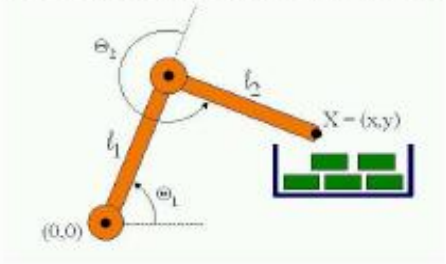
$$\Theta_1(0) = 60° \quad \Theta_2(0) = 250°$$
$$\frac{d\Theta_1}{dt} = 1.2 \quad \frac{d\Theta_2}{dt} = -0.2$$

On peut ensuite calcule la position initiale $X(0)$ et la vitesse $\frac{dX}{dt}$.

9

Cinématique inverse

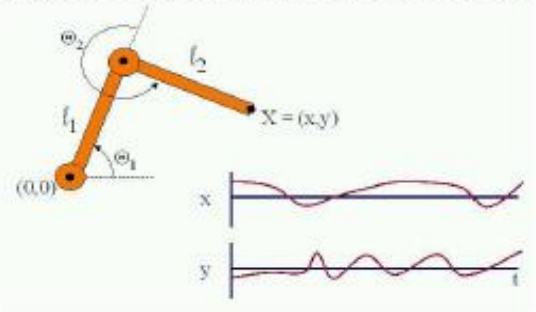
Et si l'animateur connait la position du bout de la chaîne X ?



On va calculer les angles des joints Θ_1 et Θ_2 à partir de X.
→ cinématique inverse.

Cinématique inverse

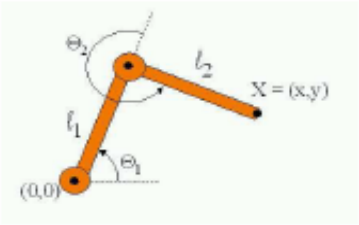
On peut animer la position de X par des courbes d'interpolation



En ce qui concerne les calculs...

Cinématique inverse

Facile !



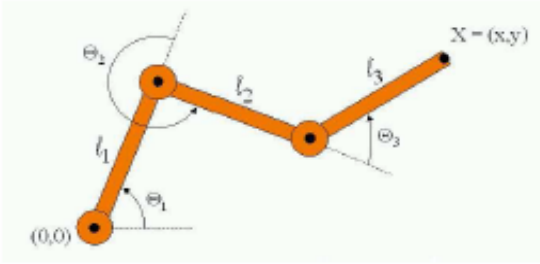
$$\Theta_2 = cos^{-1}\left(\frac{x^2+y^2-l_1^2-l_2^2}{2l_1l_2}\right)$$
$$\Theta_1 = \cdots$$

En fait...

Cinématique inverse

Pas si facile !

- Solutions multiples possibles (systèmes sous-déterminés)
- Équations non-linéaires



(ici on a 3 inconnues $\Theta_{1\ldots3}$ et deux équations avec (x, y))

Cinématique inverse

Comment procéder ?

→ pas de solution miracle.

- Optimisation non-linéaire
- Minimisation d'énergie
- Simulation avec forces
- Jacobien

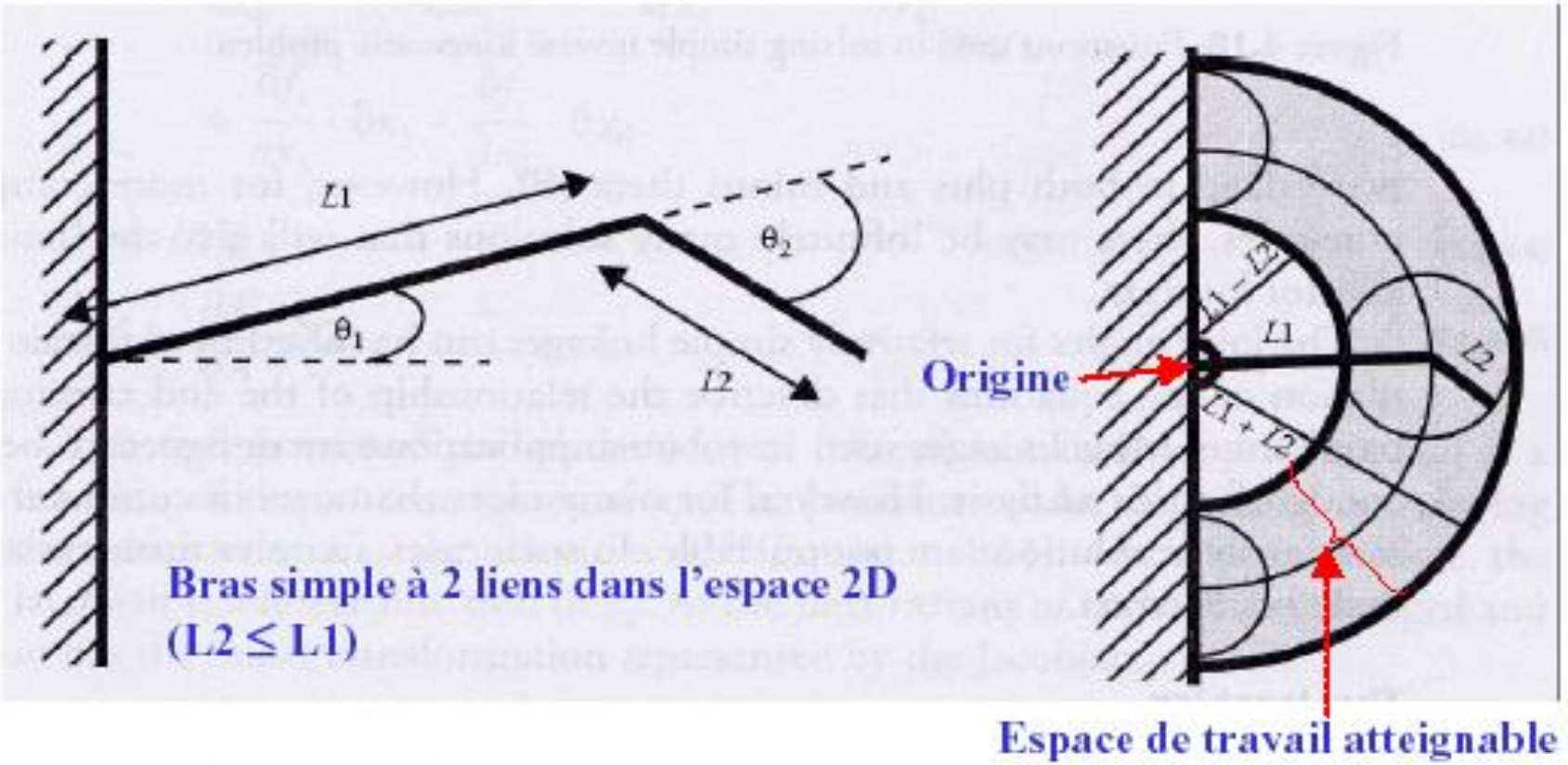
Jacobien

Jacobien
Détermine la relation entre la **vitesse** du point de contrôle X et la vitesse des joints Θ_i.

Intuitivement
Le Jacobien détermine la vitesse *instantanée* de X en fonction de la vitesse de Θ_i.
Alors le **Jacobien inverse** détermine la vitesse de Θ_i en fonction de la vitesse de X (qui est donnée par l'animateur).

$$d\mathbf{X} = \mathbf{J}(\Theta)d\Theta$$
$$d\Theta = \mathbf{J}(\Theta)^{-1}d\mathbf{X}$$

Résolution d'un système simple par analyse

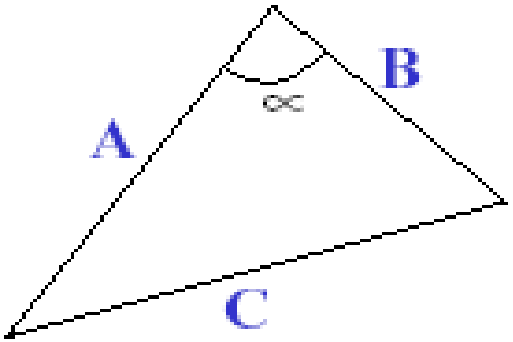


La première opération consiste à s'assurer que la position du but est à portée de l'effecteur final : $L1 - L2 \leq \sqrt{x^2 + y^2} \leq L1 + L2$,

où (x, y) désigne la position de l'effecteur final.

49

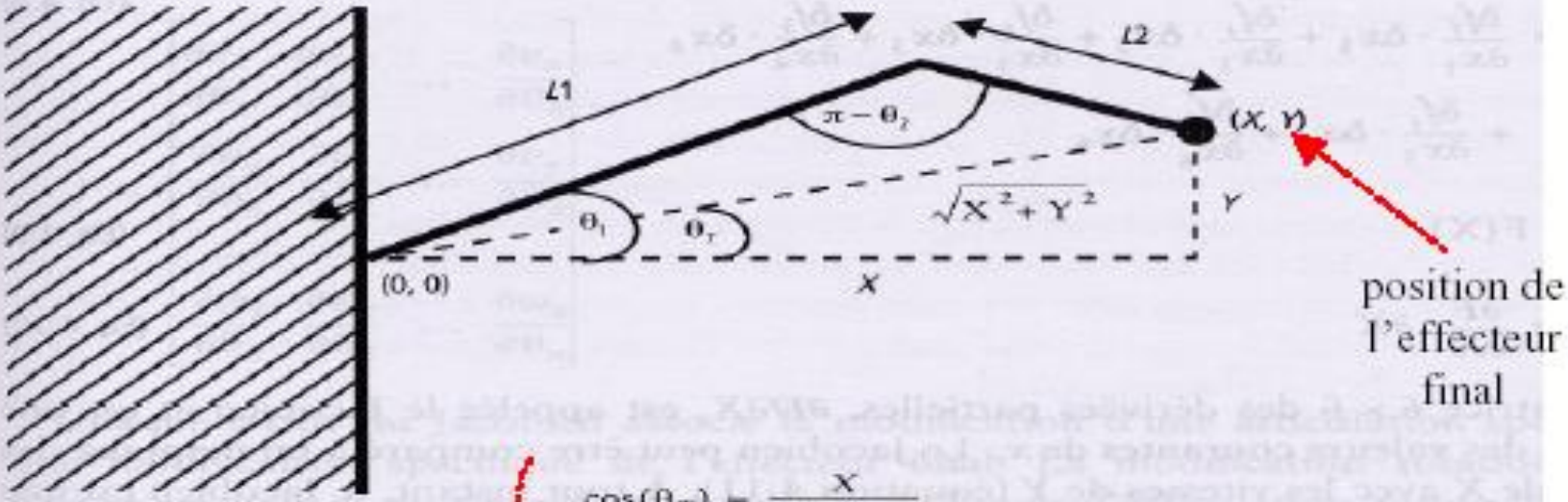
Rappel : règle du cosinus



$$|C|^2 = |A|^2 + |B|^2 - 2\,|A| \cdot |B| \cos \propto$$

où |A|, |B| et |C| désignent la longueur des côtés A, B et C resp.

Résolution d'un système simple (suite)



Calcul des angles d'articulation θ_1 et θ_2

$$\cos(\theta_T) = \frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

$$\theta_T = \text{acos}\left(\frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right)$$

$$\cos(\theta_1 - \theta_T) = \frac{L1^2 + X^2 + Y^2 - L2^2}{2 \cdot L1 \cdot \sqrt{X^2 + Y^2}} \quad \text{(loi cosinus)}$$

$$\theta_1 = \text{acos}\left(\frac{L1^2 + X^2 + Y^2 - L2^2}{2 \cdot L1 \cdot \sqrt{X^2 + Y^2}}\right) + \theta_T$$

$$\cos(\pi - \theta_2) = \frac{L1^2 + L2^2 - (X^2 + Y^2)}{2 \cdot L1 \cdot L2} \quad \text{(loi cosinus)}$$

$$\theta_2 = \text{acos}\left(\left(\frac{L1^2 + L2^2 - (X^2 + Y^2)}{2 \cdot L1 \cdot L2}\right)\right)$$

Il existe 2 solutions symétriques p/r à l'axe (0,0)-(X,Y) à cause de l'arccosinus.

En l'absence de solutions analytiques ...

- Pour des structures plus complexes, il peut y avoir un nombre extrêmement élevé de solutions x qui donneront la position souhaitée de l'effecteur final y tel que $F(x) = y$.
- En animation par ordinateur, de nombreuses situations se présentent où l'approche analytique ne peut être considérée.
- Il faut avoir recours à des **solutions numériques itératives** pour résoudre le système $F(x) = y$.

Définition :

Soit la fonction $F : \Re^n \rightarrow \Re^m$ au point x,
alors la **matrice jacobienne $J_F(x)$** de F est :

$$J_F(x) = \nabla F(x) = \begin{pmatrix} \partial F_1(x)/\partial x_1 & \partial F_1(x)/\partial x_2 & \dots & \partial F_1(x)/\partial x_n \\ \partial F_2(x)/\partial x_1 & \partial F_2(x)/\partial x_2 & \dots & \partial F_2(x)/\partial x_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \partial F_m(x)/\partial x_1 & \partial F_m(x)/\partial x_2 & \dots & \partial F_m(x)/\partial x_n \end{pmatrix}$$

Méthode de Newton-Raphson généralisée

Le problème consiste à trouver le vecteur $\mathbf{x}$ tel que :

$$\begin{cases} f_1(x) = y_1 \\ f_2(x) = y_2 \\ \cdots\cdots\cdots \\ f_m(x) = y_m \end{cases} \qquad \text{où } \mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdots \\ y_m \end{bmatrix} \text{ est fixé.}$$

Partant d'une solution x_0,

à l'itération k, on obtient : $x_{k+1} = x_k + z_k$

où z_k est une solution du système d'équations linéaires

$$J_F(x_k)\, z = y - F(x_k). \qquad (*)$$

1er cas : m = n et l'inverse du Jacobien existe

$$z_k = J_F^{-1}(x_k)\,(y - F(x_k)).$$

Méthode de Newton-Raphson généralisée (suite)

2ième cas : m = n et l'inverse du Jacobien n'existe pas

Le système est singulier i.e. il n'existe pas de solution au problème.

3ième cas : m < n, la matrice n'est pas carrée et l'inverse du Jacobien n'est donc pas défini

Il y a plus de DDL qu'il n'y a de contraintes à satisfaire.

Il existe une infinité de solutions au problème.

Pour en trouver une, on considère les inverses généralisés pour résoudre ce système : $J_F(x_k)\, z = y - F(x_k)$.

De manière compacte, il s'agit de trouver z tel que

$$Az = b$$

ou $$A^tAz = A^tb$$

ou $$z = (A^tA)^{-1}\, A^tb$$

inverse généralisé de $A = (A^tA)^{-1}\, A^t$

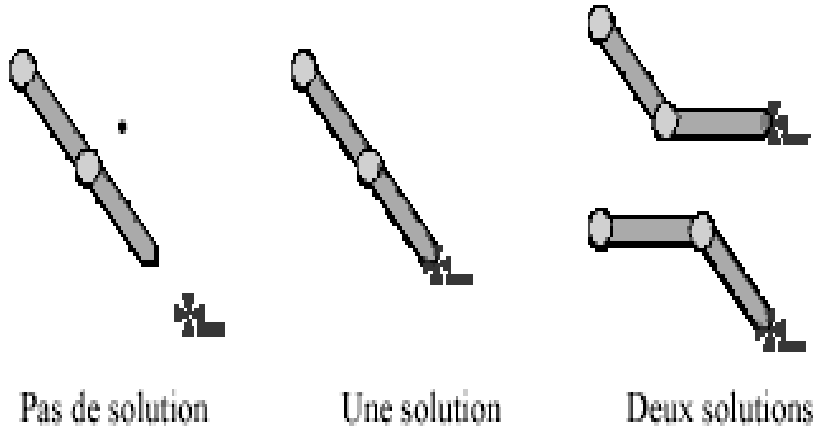
Limitations de la solution analytique cinématique inverse

- Non fonctionnelle
  - Quand l'espace de solution est grand
  - Quand l'objectif n'est pas atteignable
- Solution
  - Cinématique inverse par méthode numérique
  - Introduction des algorithmes itératifs pour résoudre les contraintes multiples

La cinématique inverse a d'importants défauts:

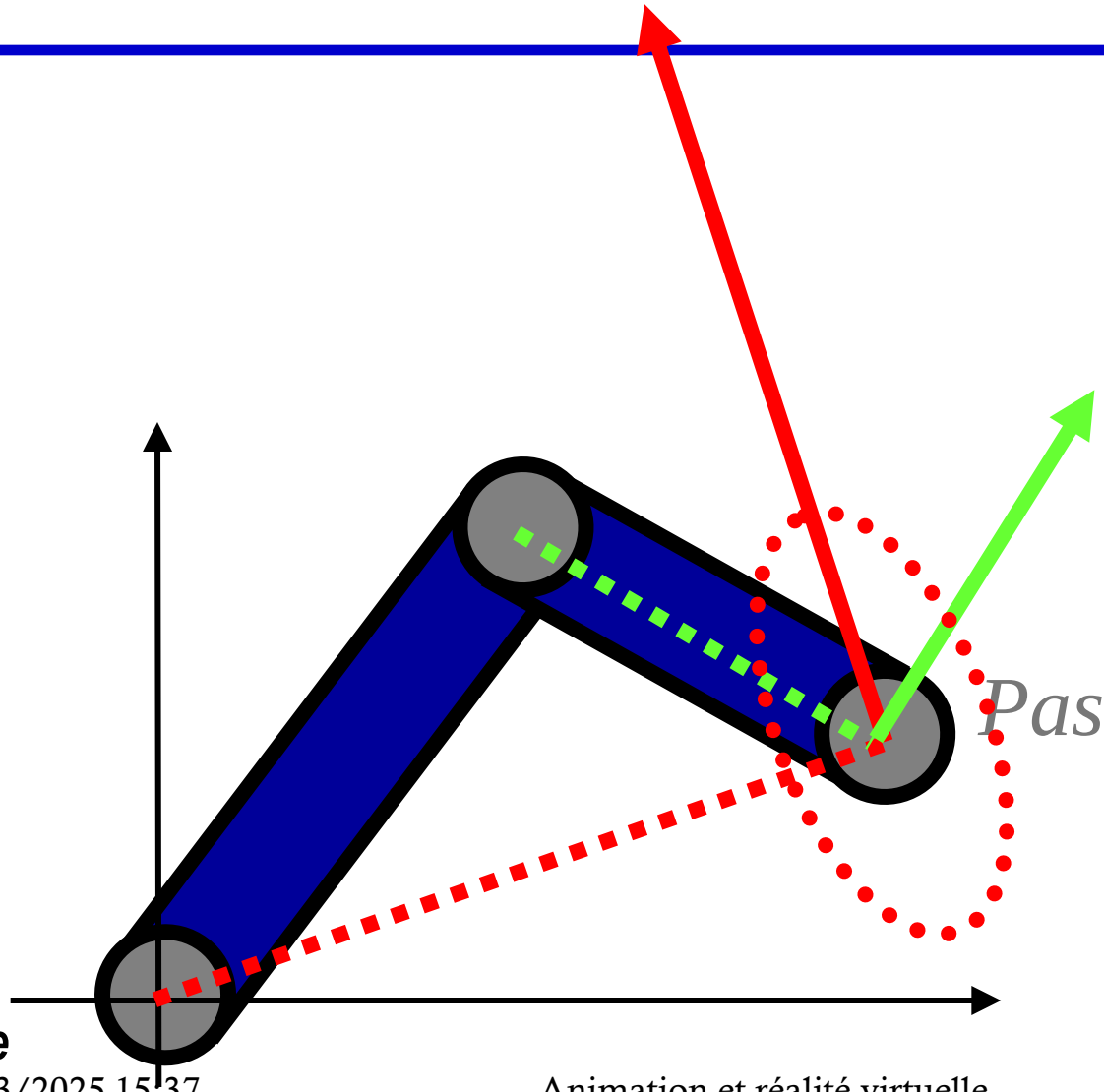
- fonctionne bien pour de simples liens, mais mal pour des trop complexes.
- ainsi, facile de trouver de combien fléchir coude et poignet pour parvenir à un objet avec la main
- pas aisé de mettre en jeu épaule et doigts.
- De plus, problème du choix lorsque plusieurs possibilités:
- l'animateur doit alors intervenir ou laisser le système faire un choix (minimisation d'énergie).

Existence et unicité des solutions



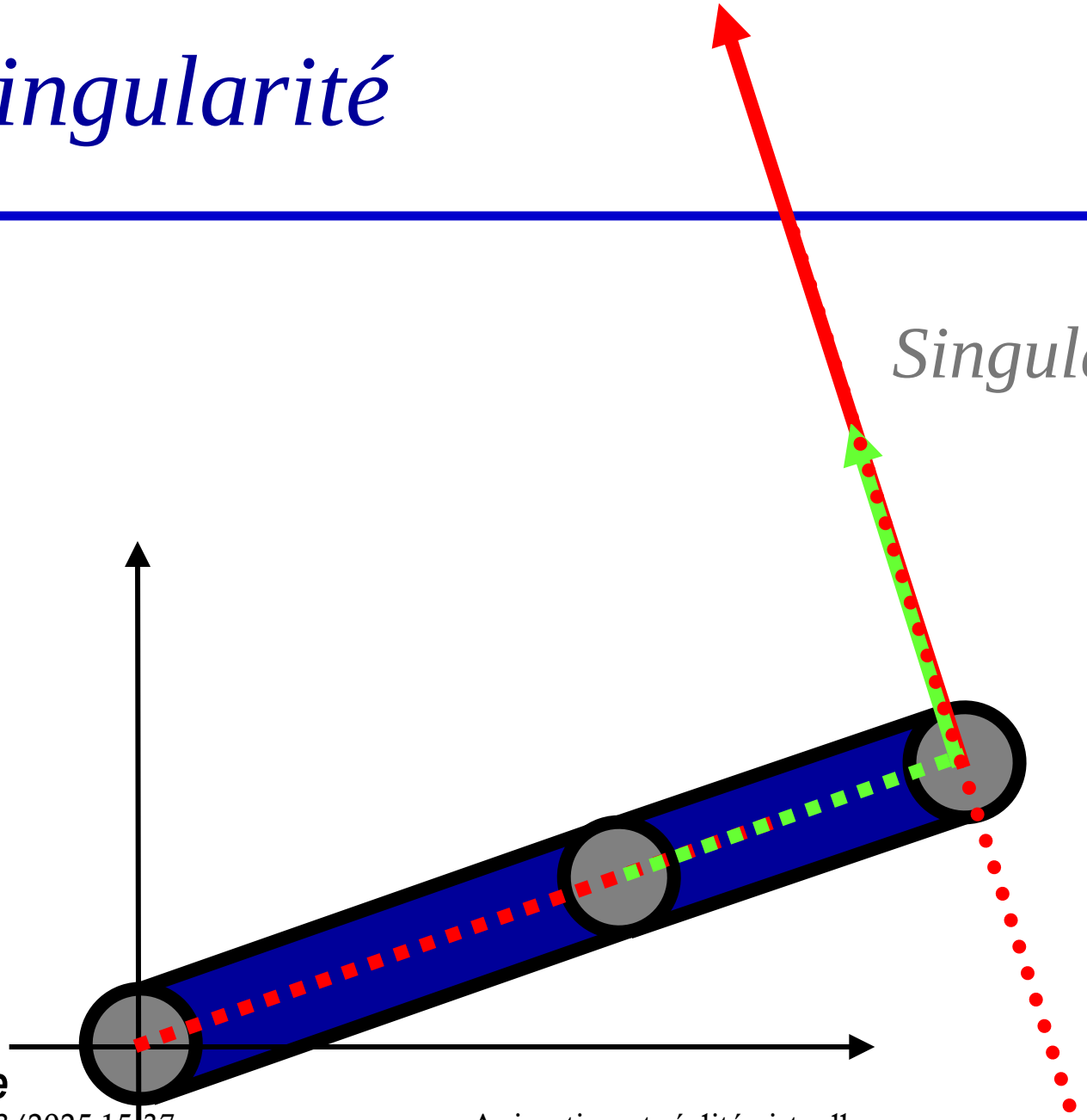
Pas de solution | Une solution | Deux solutions

Singularité



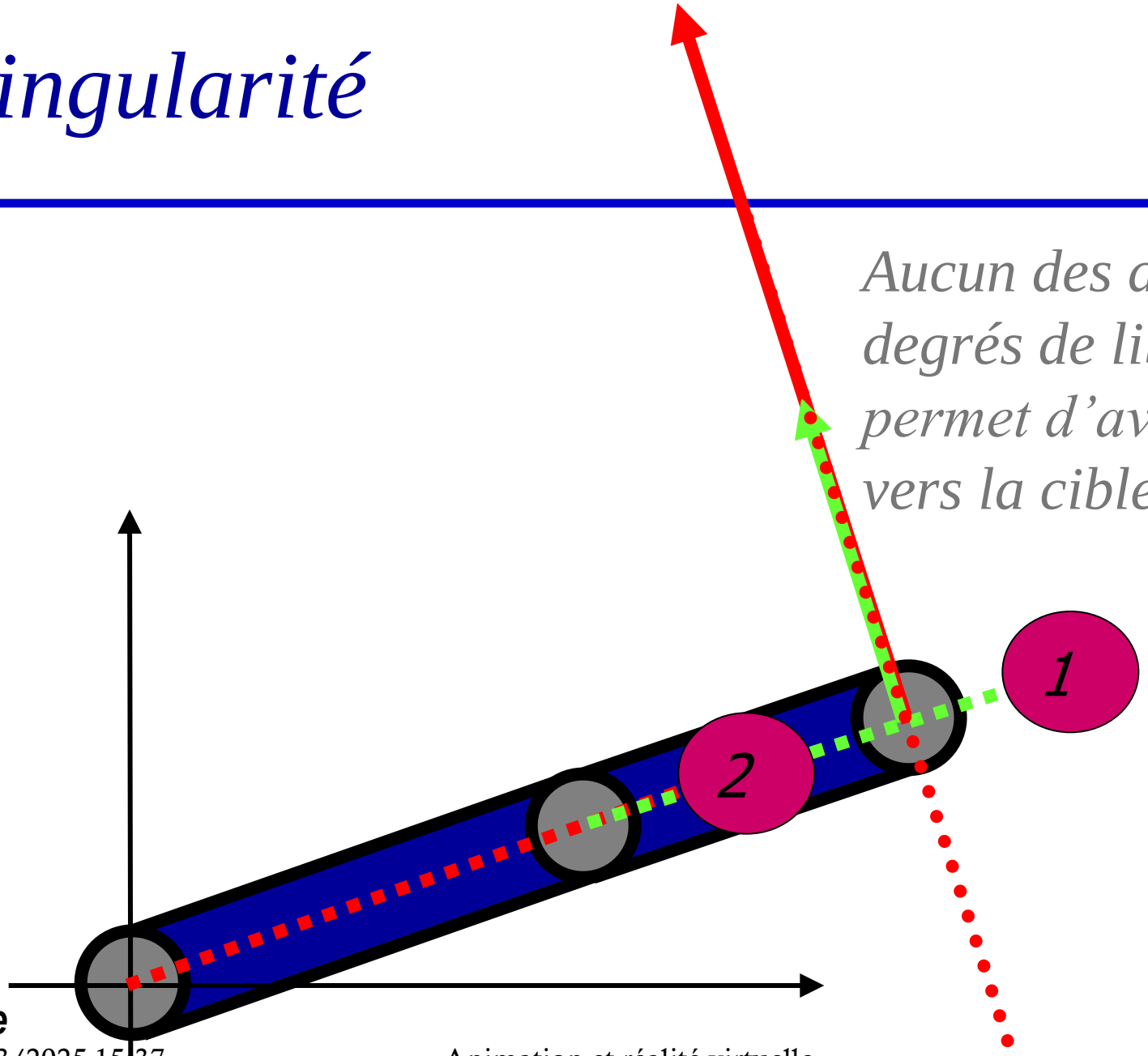
Pas de singularité

Singularité



Singularité

Aucun des deux degrés de liberté ne permet d'avancer vers la cible 1 ou 2



Défauts de la cinématique inverse

- Fonctionne mal pour les longues chaîne
- Problème de choix lorsque plusieurs possibilités, l'animateur doit alors intervenir ou laisser le système faire un choix.
- Ne tient pas compte des lois physiques.

- ➔ l'utilisation de la **dynamique**
- Utilise, les forces, les mouvements des forces, les propriétés des masses des objets

Pourquoi la dynamique ?

- **Les systèmes basés sur la cinématique sont intuitifs**
- **Mais ils manquent d'intégrité dynamique**
- **L'animation ne semble pas correspondre à des faits physiques: gravité ou inertie**
- **Seuls les objets avec mouvements sous l'action de forces et de moments de forces sont réalistes.**
- **Forces et moments de forces provoquent accélérations linéaires et angulaires.**
- **Mouvement obtenu par équations de la dynamique**
- **Equations établies en utilisant forces, moments de forces, contraintes et propriétés de masse des objets.**

Avantages d'utiliser la dynamique

- **libère l'animateur de la description des mouvements dus aux lois physiques**
- **l'animation des phénomènes est plus réaliste du moins du point de vue physique.**
- **les corps peuvent réagir automatiquement à des contraintes internes et externes telles que des champs, des collisions, des forces ou des mouvements.**

Et les problèmes ?

- **Systèmes basés sur dynamique généralement difficile à utiliser pour un animateur**
- **Paramètres (forces, moments de forces) difficiles à ajuster (pas de nature intuitive).**
- **Temps CPU nécessaire pour résoudre les équations du mouvement d'un corps articulé complexe à l'aide de méthodes numériques est souvent prohibitif.**
- **Mouvements basés sur la dynamique réalistes, mais trop réguliers, ne tiennent pas compte de la personnalité des personnages.**

Avantages de l'animation dynamique

- ***Réalisme***
  évolutions conformes aux lois de la physique.

- ***Automatisation***
  génération spontanée du mouvement à partir des conditions initiales et des efforts extérieurs

- ***« Echelle »***
  prise en compte naturelle des interactions entre de nombreux objets

Inconvénients de l'animation dynamique

- ***« Culture scientifique »***
  Connaissance approfondie des modèles physico-mathématiques
- ***Coût calculatoire***
  Evaluation des efforts extérieurs, résolution des équations du mouvement
- ***Manque de contrôle***
  Adéquation entre le mouvement à produire et les efforts à générer

Equation du mouvement

Loi fondamentale de la dynamique

$$\frac{d}{dt}\left(m\,\mathbf{v}\left(M(t)\right)\right)=\mathbf{f}$$

Si la masse *m* est constante

$$\frac{d}{dt}\left(m\,\mathbf{v}\left(M(t)\right)\right)=m\frac{d\mathbf{v}}{dt}\left(M(t)\right)=m\,\mathbf{a}\left(M(t)\right)$$

$$m\,\mathbf{a}\left(M(t)\right)=\mathbf{f}$$

Modèles de la dynamique

- Equation de Newton : $\Sigma F = m \ddot{x}$;
- ou l'équation du second ordre :

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + d\frac{dx}{dt} + sx = \sum_i Fi$$

d représente l'amortissement (damping) et s la raideur (stiffness)

- pour la rotation :

$$I\frac{d\omega}{dt} = \sum_i T_i$$

$$I = \begin{bmatrix} \int (y^2 + z^2)dm & -\int xydm & -\int xzdm \\ -\int xydm & \int (x^2 + z^2)dm & -\int yzdm \\ -\int xzdm & -\int yzdm & \int (x^2 + y^2)dm \end{bmatrix}$$

- Equation de Lagrange : $d/dt\ (\partial L/\partial q') - \partial L/\partial q = \Sigma F$
- forme développée : $M(q)\ddot{q} + C(q,q')q' + Kq = \Sigma F$

M matrice d'inertie Coriolis et K matrice de raideur

Cinématique direte

1. Qu'est-ce que la Cinématique ?

Kinematique : Étude du mouvement sans tenir compte des forces. On s'intéresse ici aux positions, vitesses et trajectoires.

Cinématique inverse

2. Qu'est-ce que la Cinématique Inverse ?

La cinématique inverse est une méthode de calcul utilisée pour déterminer les mouvements des articulations d'un système (par exemple, un personnage en 3D) de manière à atteindre une position voulue pour un ou plusieurs de ses extrémités (comme les mains ou les pieds).

Contrairement à la cinématique directe, où l'on fixe les angles des articulations pour obtenir une position finale, la CI consiste à déterminer ces angles à partir d'une position finale donnée.

Cinématique inverse

3-Applications de la CI :

- **Animation de personnages :**

Permet aux animateurs d'ajuster facilement la position des bras et des jambes d'un personnage pour qu'il atteigne un objet ou suive un chemin.

Lorsqu'un personnage doit toucher un objet, la CI permet de déterminer les angles nécessaires pour que ses membres s'ajustent correctement.

- **Environnements interactifs:**

Dans les jeux vidéo, permet de gérer la façon dont les personnages interagissent avec leur environnement (par exemple, saisir des objets ou grimper).

Cinématique inverse

3-Applications de la CI :

- **Robots et mécaniques :**

Utilisé pour programmer le mouvement des bras robotiques ou des pièces mobiles.

- *Les personnages ou objets animés sont modélisés comme des chaînes de blocs rigides reliés par des articulations. Chaque articulation peut avoir des degrés de liberté (rotations ou translations) qui contrôlent les mouvements.*

Cinématique inverse

4. Algorithmes de CI :

Il existe plusieurs méthodes pour résoudre des problèmes de CI, les plus courantes étant :

- **A- Algorithmes géométriques : (ou analytique)**

Utilisent des principes géométriques pour résoudre la cinématique inverse, souvent en se basant sur des triangles et des relations espaciales entre les joints et l'objectif.

- **B- Méthodes itératives :**

Telles que la méthode de Newton-Raphson, utilisées pour converger vers une solution.

Cinématique inverse

- **B-1 Newton-Raphson :**

Algorithme itératif qui converge vers une solution en ajustant progressivement les valeurs des angles jusqu'à ce que la position de l'end-effector corresponde à la position cible.

- **B-2 Gradient Descent:**

Ciblent la minimisation d'une fonction d'erreur qui représente la distance entre la position actuelle et la position souhaitée. Cet algorithme ajuste les angles des articulations selon le gradient de cette fonction.

- **C- Méthodes de l’optimisation :**

Techniques comme l'optimisation par contraintes, les algorithmes génétiques, ou des méthodes parallèles qui peuvent être utilisées pour des configurations complexes où les solutions ne sont pas uniques ou où plusieurs contraintes doivent être satisfaites.

La dynamique

5-Qu'est-ce que la Dynamique ?

La dynamique s'intéresse à la manière dont les forces et les mouvements influencent le comportement des objets. Dans le contexte de l'animation, la dynamique permet de simuler des mouvements réalistes en tenant compte des lois de la physique (comme la gravité, les collisions, etc.).

La dynamique prend en compte les forces et les moments qui produisent le mouvement, tandis que la cinématique se concentre seulement sur les mouvements.

La dynamique

6- Éléments clés de la dynamique :

- **Forces** : Comprend la gravité, les forces de contact, et d'autres influences comme la friction et les impulsions.
- **Masse et Accélération**: Basé sur la seconde loi de Newton (F = ma), où (F) est la force, (m) est la masse et (a) est l'accélération.

Cinématique inverse

7- Approches de simulation dynamique :

- **A. Dynamique Rigide :**

Utilisation de modèles physiques pour représenter des objets solides. Chaque objet a un centre de masse, inertie, etc. Les mouvements sont calculés en fonction des forces appliquées et du moment cinétique.

- **B. Dynamique Souple :**

Utilise des techniques de simulation pour créer des objets qui peuvent se déformer. Ce peut inclure les tissus, les liquides ou d'autres matériaux. Les simulations peuvent inclure des maillages (grids) qui se déforment sous l'influence de forces.

Cinématique inverse

- **7- Approches de simulation dynamique** :
- ***C. Systèmes de Particules :***

Pour modéliser des phénomènes complexes comme les fluides, les explosions, ou les nuages de poussière. Chaque particule représente un point dans l'espace, et leurs interactions peuvent simuler des mouvements crédibles.

- **8-Applications de la Dynamique**
- **Simulation de mouvements naturels** : Les mouvements doivent sembler réalistes, par exemple, simuler la chute d'un personnage ou la balancée d'une branche au vent.
- **Effets spéciaux** : Generating realistic explosions, smoke, fire effects, and other phenomena that require complex physical behavior.

Dynamique vs Cinématique inverse

7-Liens entre CI et Dynamique

Dans les applications d'animation avancées, la cinématique inverse et la dynamique sont souvent combinées. Par exemple :

Lorsqu'un personnage doit interagir avec son environnement, la CI peut positionner ses membres, tandis que la dynamique peut simuler comment son corps réagit sous l'influence des forces (comme le poids ou les collisions).

La cinématique inverse et la dynamique sont des outils essentiels pour créer des animations réalistes,

Application de la dynamique(le jeu de billard)

- l'animation dynamique peut être utilisée très efficacement pour simuler un jeu de billard. Cela implique plusieurs concepts de dynamique, de cinématique, et de physique qui sont essentiels pour représenter avec précision le comportement des boules, des coups et des interactions entre les éléments du jeu
- **Concepts Clés pour la Simulation du Billard**
- **1- Dynamique Rigide** :

Chaque boule peut être modélisée comme un objet rigide ayant des propriétés comme la masse, le rayon, et un centre de masse. La dynamique rigide permet de calculer les mouvements de ces boules en réponse aux forces appliquées.

Application de la dynamique(le jeu de billard)

- **Concepts Clés pour la Simulation du Billard**
- **2- Collisions**:
- Les interactions entre les boules sont essentielles dans un jeu de billard. Quand deux boules se rencontrent, le moteur de simulation doit gérer la détection de la collision et calculer la réponse appropriée. Cela peut impliquer :
  - Collision élastique: Les boules de billard rebondissent les unes contre les autres, et l'énergie cinétique est conservée dans une collision élastique.
  - Transfert de quantité de mouvement : Quand une boule frappe une autre, elle transfère une partie de sa quantité de mouvement à l'autre boule.

Application de la dynamique(le jeu de billard)

- **Concepts Clés pour la Simulation du Billard**
- **3- Forces et Friction** :
  - Les boules ont des forces de friction qui influencent leur mouvement sur la table. La friction entre les boules et la surface de la table affecte leur vitesse et leur direction. Ajuster les coefficients de friction peut simuler différents types de tables de billard.
- **4- Gravité :**
  - La gravité influence le mouvement des boules sur la table. Bien que la table soit plane, la gravité doit être prise en compte pour simuler des effets comme la déformation potentielle des balles sur une très légère pente ou un retour.

Application de la dynamique(le jeu de billard)

- **Concepts Clés pour la Simulation du Billard**
- **5- Mouvement de la Queue** :
  - La dynamique n'implique pas seulement les boules, mais aussi le mouvement de la queue de billard. La simulation peut inclure des aspects de cinématique pour animer le mouvement de la queue à l'impact.

Application de la dynamique(le jeu de billard)

- **Étapes de la Simulation d'un Jeu de Billard**
- **1- Modélisation :**

Créez un modèle 3D de la table de billard, des boules et de la queue. Chacune de ces entités doit avoir des propriétés physiques qui définissent leur comportement (masse, radius, etc.)

- **2- Calcul de Trajectoire :**

Lorsqu'un coup est donné, calculer la direction et la force appliquée à la bille blanche. Cela nécessite la prochaine étape de calcul de la quantité de mouvement.

Application de la dynamique(le jeu de billard)

- **Étapes de la Simulation d'un Jeu de Billard**
- **3- Détection de Collision :**

Implémentez une méthode pour détecter les collisions. Cela inclut la vérification de l'intersection entre les sphères (boules) et la surface de la table. Si une collision est détectée, calculez la réponse à la collision.

- **4- Gestion des Interactions :**

Après une collision, calculez les nouvelles vitesses et directions des boules en utilisant les lois de conservation de l'élan. Cela implique des calculs vectoriels pour déterminer la direction dans laquelle chaque boule se déplacera après l'impact.

Application de la dynamique(le jeu de billard)

- **Étapes de la Simulation d'un Jeu de Billard**
- **5-Simulation du Mouvement :**

Mettez à jour en continu la position des boules en fonction de leur vitesse et de la friction jusqu'à ce qu'elles s'immobilisent ou répondre à un événement particulier (comme un goal).

- **6- Rendu Visuel :**

Produisez le rendu graphique du jeu, en rendant chaque boule avec des textures réalistes et en animant les mouvements de manière fluide.

Application de la dynamique(le jeu de billard)

Conclusion

La simulation d'un jeu de billard est un excellent exemple de l'application de l'animation dynamique dans un contexte interactif.

Elle démontre l'utilisation des lois physiques de base pour créer une expérience immersive et réaliste, tant pour le gameplay que pour l'esthétique visuelle. Avec les technologies d'aujourd'hui, il est possible de créer des simulations presque réalistes qui réagissent aux actions des joueurs de manière précise.

Application de la dynamique(le jeu de billard)

- **Calcul des Nouvelles Directions et Vitesses des Boules**
- Lorsque la boule blanche (ou la boule que le joueur frappe) touche une autre boule, plusieurs étapes sont nécessaires pour calculer les nouvelles directions et vitesses :
- 1- Calcul de la Vitesse et de la Direction de la Boule Frappeuse :

- Lors de la frappe, la vitesse de la boule blanche dépend de la force appliquée par la queue de billard et de son angle d'impact. Cette force se traduit par une vitesse initiale qui peut être calculée en utilisant la deuxième loi de Newton (F = ma), où (F) est la force, (m) la masse de la boule, et (a) l'accélération.

- La vitesse initiale (en termes de vecteurs) est déterminée par la direction dans laquelle le joueur frappe la boule et la force appliquée.

Application de la dynamique(le jeu de billard)

- 2- **Détection de Collision** :
- - Lorsqu'une boule entre en contact avec une autre, il est crucial de détecter ce point de collision. La classification des boules (sphères) s'effectue par vérification de la distance entre les centres des deux boules comparées à la somme de leurs rayons.
- **3-Calcul de la Normale de Collision** : Au point d'impact, on détermine un vecteur normal qui est perpendiculaire à la surface de contact entre les deux boules. Ce vecteur est essentiel pour calculer l'angle de rebond.

Application de la dynamique(le jeu de billard)

- **Influence de la Position et de la Force de Frappe de la Queue**

- **1- Position de la Frappe :**

- La position où la queue frappe la boule blanche influence le moment d'inertie et la direction de la boule. Frapper au centre de la boule provoque un mouvement rectiligne, tandis que frapper légèrement sur le côté crée une rotation (effet “side spin”) et influence la direction dans laquelle la boule blanche se déplace après le coup.

- Un coup décentré peut faire tourner la boule, conduisant à des trajectoires courbes et à des effets variés sur les boules qui entrent en collision.

Application de la dynamique(le jeu de billard)

- **2- Force de Frappe**

- La force appliquée par la queue détermine la vitesse initiale de la boule frappante. Une force plus importante se traduit par une vitesse plus élevée, ce qui affecte la quantité de mouvement transférée à la boule cible lors de la collision.

- Une forte frappe augmente également l'énergie cinétique, ce qui peut avoir un impact sur la manière dont les autres boules se déplacent après la collision.

- **3- Angle de la Queue :**

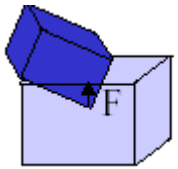
L'angle d'impact entre la queue et la boule influence non seulement la direction de la boule frappante mais également le transfert d'énergie lors de la collision.

Collisions en animation

- Durant la simulation, un objet peut entrer en contact avec un autre objet.
- Détection de collision
- Déterminer précisément quand et ou(acent) deux objets se touchent.
- Résolution de collision
- Déterminer comment la collision affecte le mouvement des objets.

Interactions entre objets

- **Détection des interpénétrations**



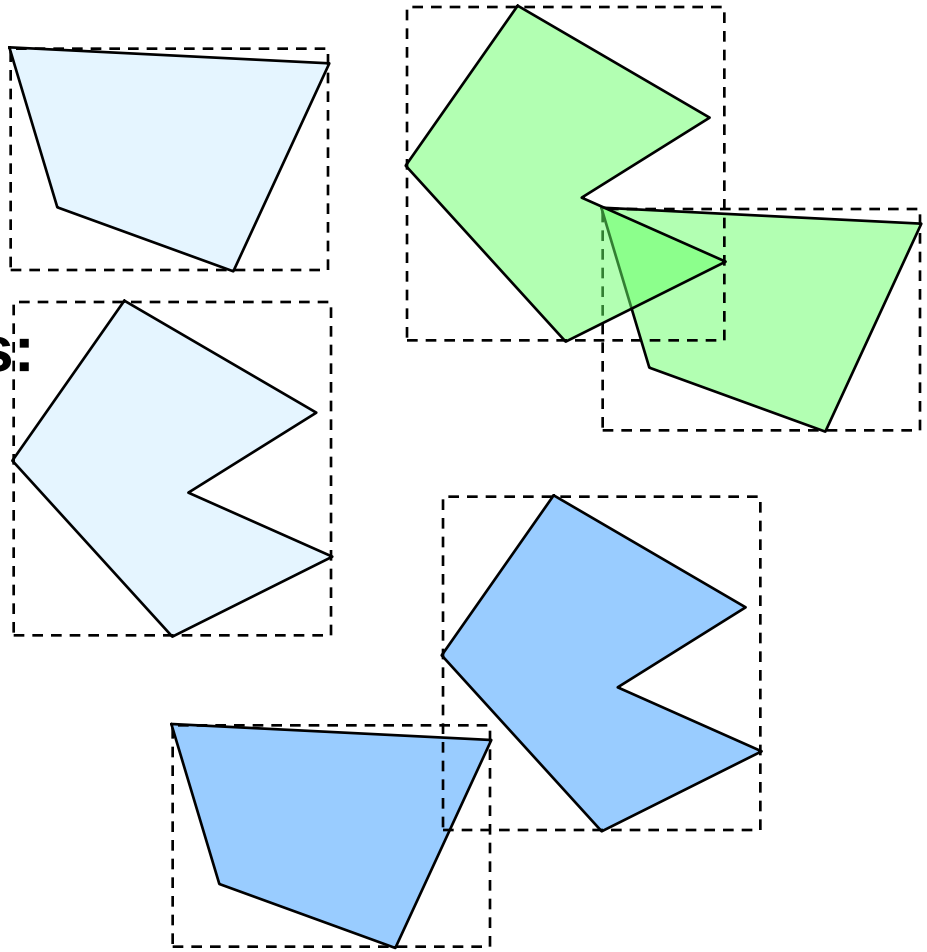
- **Réponse aux collisions**

  choc rigide: modification des vitesses

  choc mou ou contact: force de réaction

Interactions entre objets Collisions

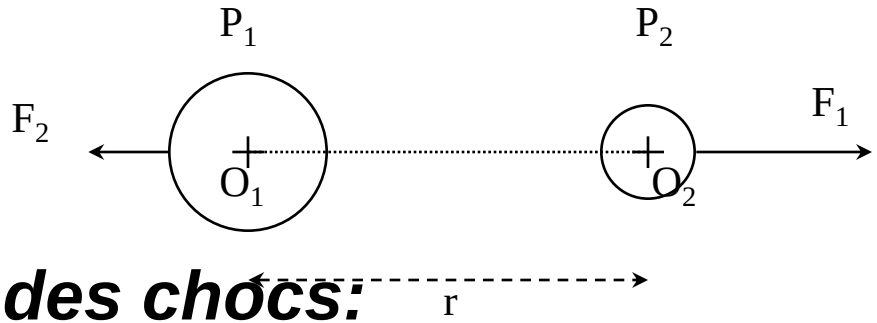
- **Détection de collisions:**
  - volumes englobants.
- **Prise en compte des chocs:**
  - énergie potentielle;
  - ressort virtuel;
  - force de réaction.



Interactions entre objets collisions

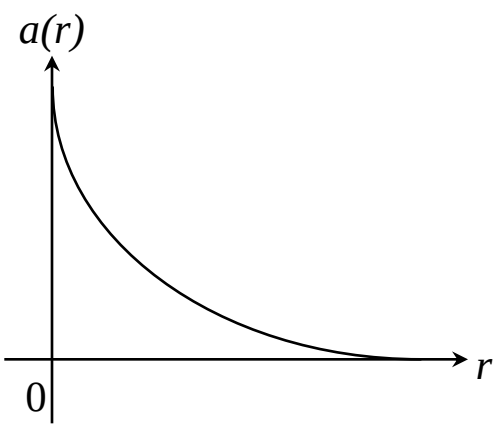
- **Collisions:**
  - ***Prise en compte des chocs:***

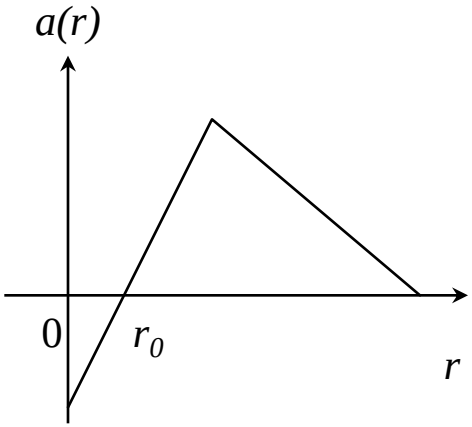
    énergie potentielle



$$\vec{F}_2 = \frac{P_2}{a_2(r)} \frac{O_2O_1}{r}$$

$$\vec{F}_1 = \frac{P_1}{a_1(r)} \frac{O_1O_2}{r}$$

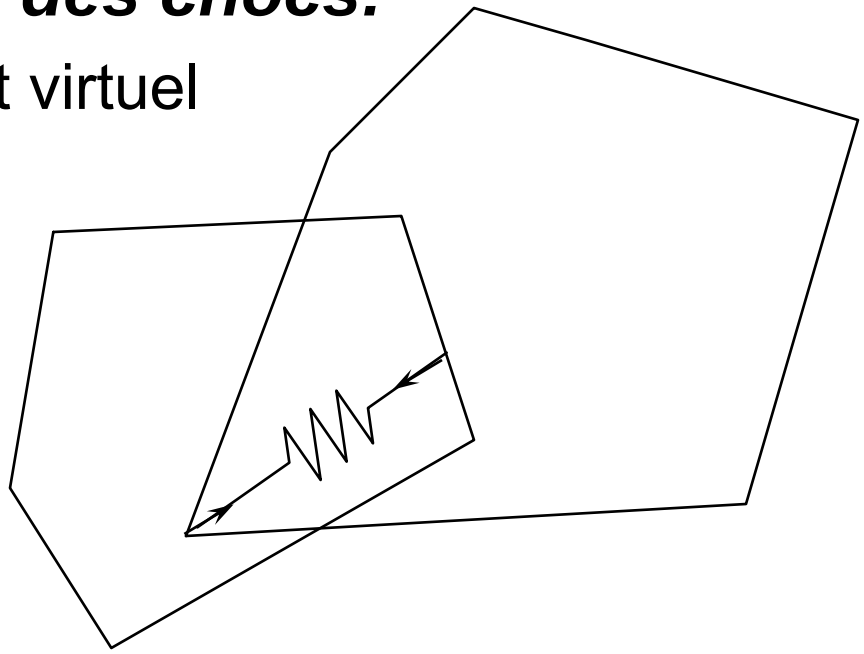




Interactions entre objets Collisions

- **Collisions:**
  - ***Prise en compte des chocs:***

    ajout d ’un ressort virtuel

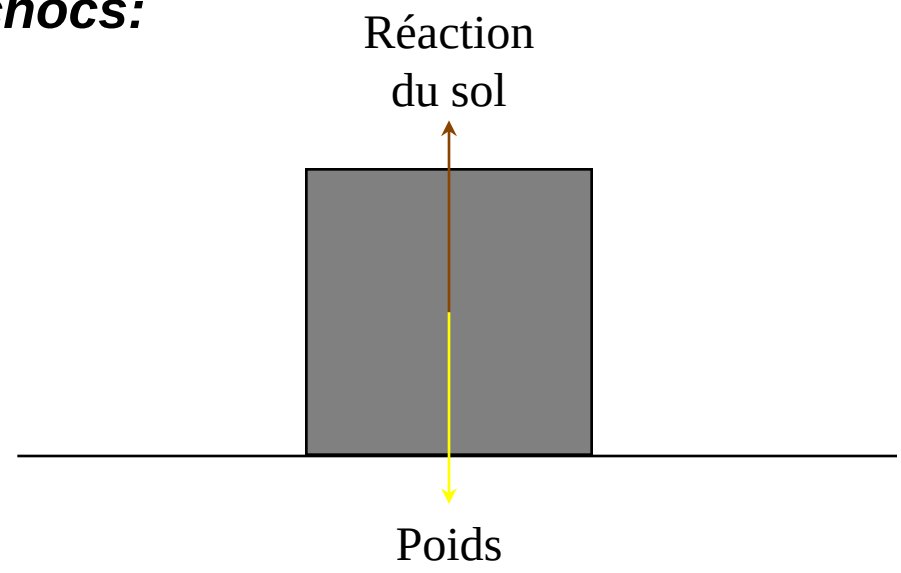


Interactions entre objets Collisions

- **Collisions:**
  - ***Prise en compte des chocs:***

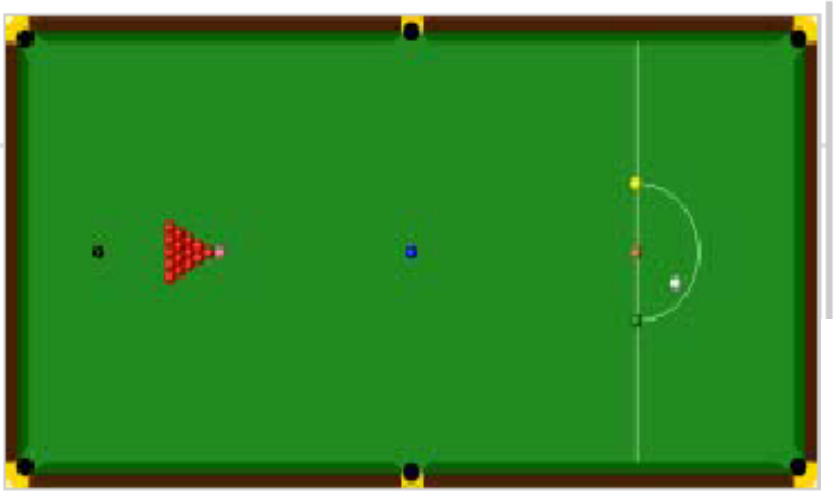
    force de réaction;

    Du sol ou du mur

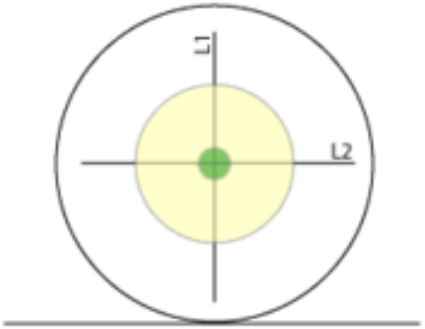


Exemples

- Jeux de billard (boule, snooker,…)
- Exemple concret de l'animation dynamique
- Interactions entre les boules peuvent être programmées.
- L'implémentation du jeux nécessite plusieurs domaines:
  - l'animation dynamique
  - L'IA, théorie des jeux, les heuristiques,..



Position des billes au début d'une partie de Snooker



Frappe d'une bille rouge

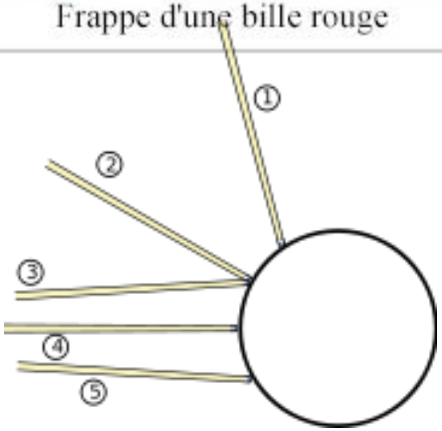
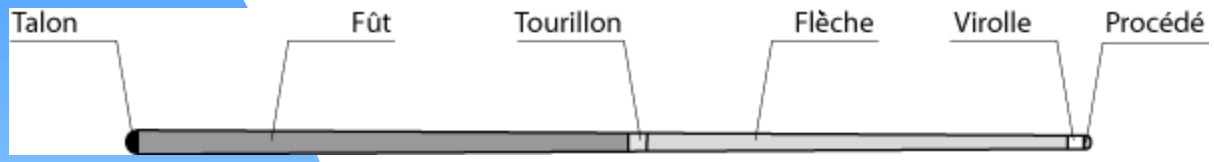
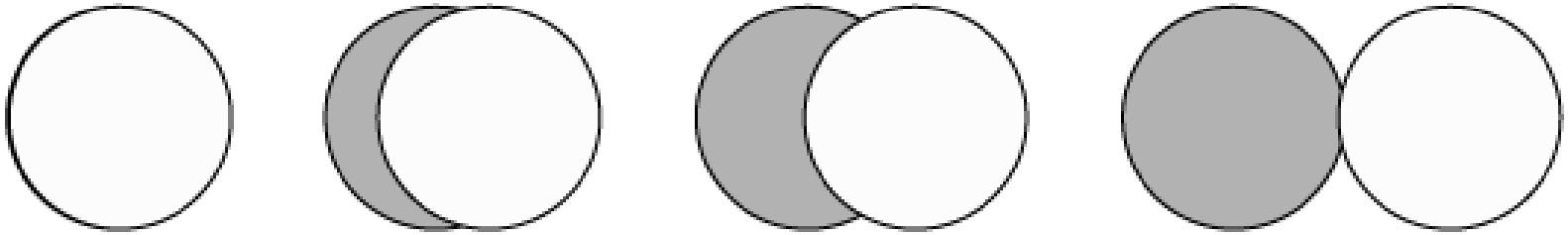


Table anglaise (3,6 × 1,8 m) :
le « Snooker » (15 billes rouges, une bille blanche et 6 billes de couleur),
le billard anglais (1 bille rouge, une blanche, une blanche pointée ou jaune),
le billard russe (1 rouge, 15 blanches, poches très étroites).



Le but de la « craie » est de faire accrocher le procédé sur la bille, et donc la mettre en rotation. Sans l'utilisation de la craie, la manipulation des effets serait impossible.

Sur les grandes tables de snooker, trois chevalets artificiels, appelés « reposoirs », sont aussi disponibles afin de permettre au joueur de tirer lorsqu'il n'a physiquement pas la possibilité de tenir sa queue correctement :



Viser « pleine bille » revient à aligner l'axe sur les 2 centres de gravité. Le transfert de masse lors du choc est entier, la bille de visée héritant de toute la force. La bille de choc s'arrête à l'impact.
Viser « 3/4 pleine » revient à aligner le centre de la bille de choc avec un point situé à la moitié du rayon de la bille de visée. Elle hérite des 3/4 de la force, 1/4 restant à la blanche
Viser « 1/2 de bille » aligne l'axe de visée sur la tangente de la bille visée. Le transfert est équivalent
Viser « 1/4 de bille » ou « 3/4 fine » revient à aligner le centre de la bille de choc avec un point situé à l'extérieur de la bille de visée, à distance d'un demi rayon. Le rapport est cette fois 1/4 pour la visée, 3/4 pour la bille de choc.
Viser « finesse » aligne le centre de la bille de choc avec un point à l'extérieur de la bille de visée à distance d'un rayon (en pratique un peu moins afin de garantir le contact). Seule une petite quantité de force est transmise à la bille de visée.

Exemples (jeux de billard)

- La modélisation de la table
- La phase d'initialisation des boules
- Suivre les règles du jeux pour déplacer les boules en tenant compte des lois de la physique de solide
- Les paramètres:
  - Les masses, couleurs, tailles,.. Des boules
  - Paramètres de frottements, tapis, queue, la bordure de la table,…
- Le jeux
  - Choix de la boule à frapper, suivant un but
  - Choix de la force de frappe
  - Choix du point de frappe, centre, dessus, dessous, coté droit ou gauche

Exemples (jeux de billard)

- Choix du point de frappe, centre, dessus, dessous, coté droit ou gauche:
  - Déplacement avant, retour, latéral, arrêt.
- Théorie utilisée:
  - À chaque choc il faux calculer la nouvelle vitesse de la boule, distance qui dépend de la masse, choc,type de frappe, frottement,..

Exemples (jeux de billard)

- **Conclusion**

La cinématique inverse et la dynamique sont des outils essentiels pour créer des animations réalistes et engageantes. La maîtrise de ces concepts, ainsi que leur combinaison, permet aux animateurs de donner vie à leurs créations numériques, que ce soit dans les films, les jeux vidéo ou les simulations. L'apprentissage de ces techniques requiert une compréhension approfondie des mathématiques et de la physique, ainsi qu'une pratique régulière dans le logiciel d'animation de votre choix.