



Nouvelles approches pour la portabilité, la non-intrusivité et l'accessibilité des interfaces de manipulation 3D

Soutenance de thèse de Paul Issartel

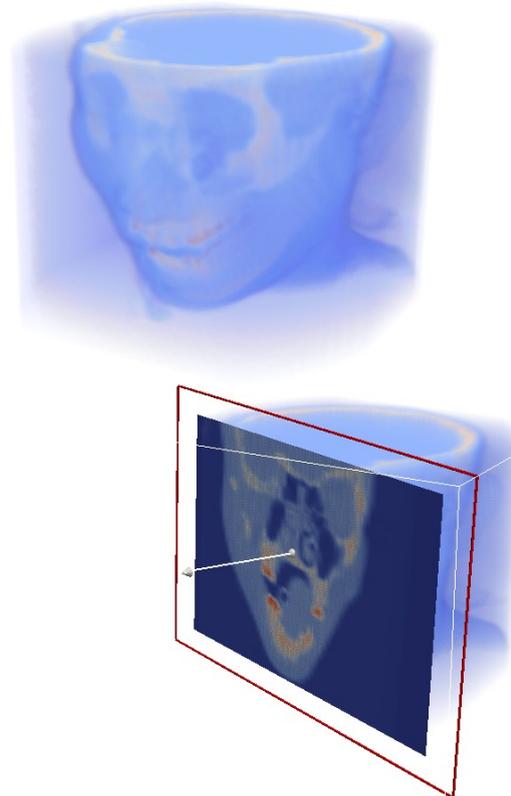
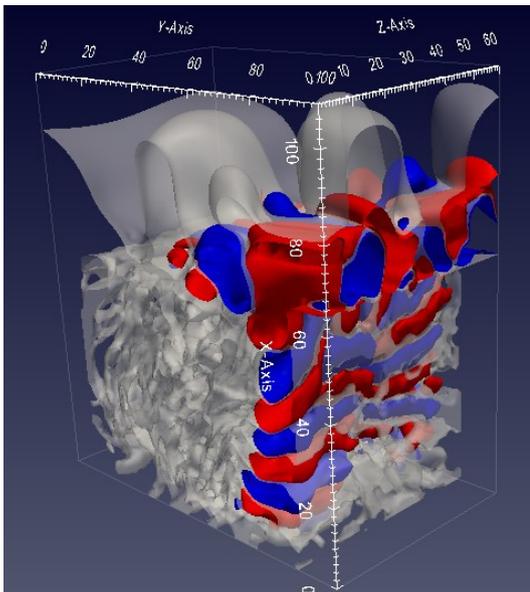
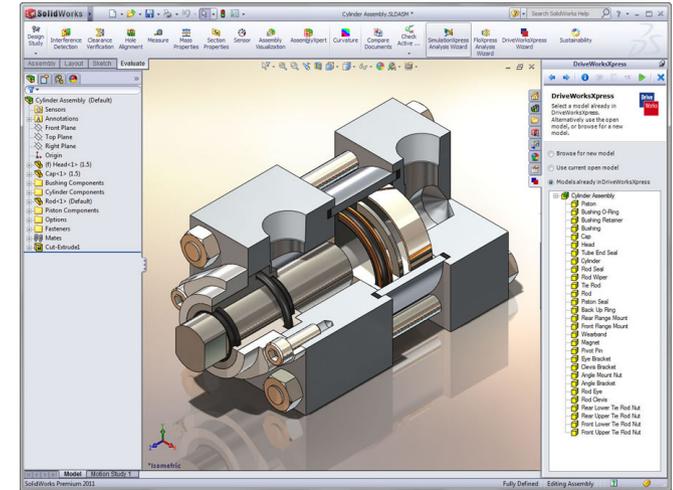
3 avril 2017 – LIMSI

Directeur de thèse : Mehdi Ammi (maître de conférences HDR, LIMSI)

Co-encadrant : Florimond Guéniat (chercheur, Université de l'Illinois)

Contexte

- De nombreux domaines d'activité reposent aujourd'hui sur les environnements virtuels 3D :
 - conception industrielle
 - simulation scientifique
 - secteur médical
 - jeu vidéo
 - ...



Manipulation 3D

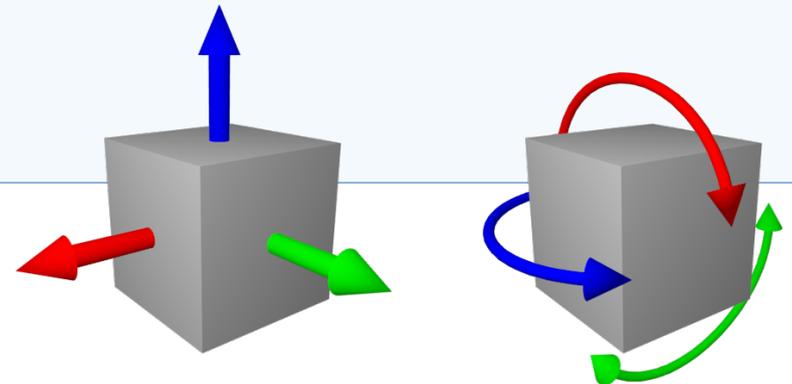
- Un aspect essentiel de l'interaction dans un tel environnement est de pouvoir manipuler les objets 3D qu'il contient :
 - sélection
 - translation suivant les axes X, Y et Z
 - rotation autour des axes X, Y et Z

► Sélection et manipulation
Navigation
Contrôle d'application
Entrée symbolique

Tâches fondamentales
[Bowman *et al.*, 2004]

Manipulation 3D : sélection, translation et rotation d'objets virtuels (rigides) dans un environnement tridimensionnel.

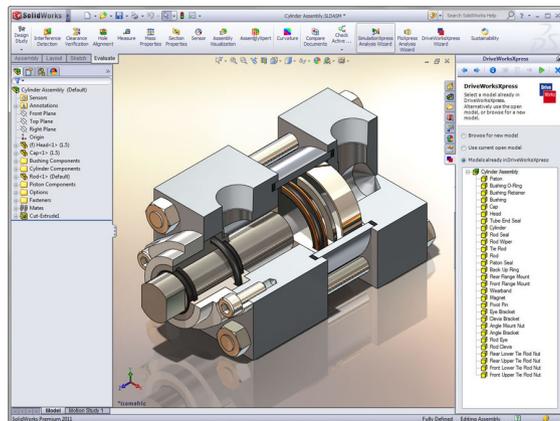
- Cette tâche nécessite de contrôler jusqu'à **6 degrés de liberté** (DdL) simultanément :
 - 3 DdL pour les translations
 - 3 DdL pour les rotations



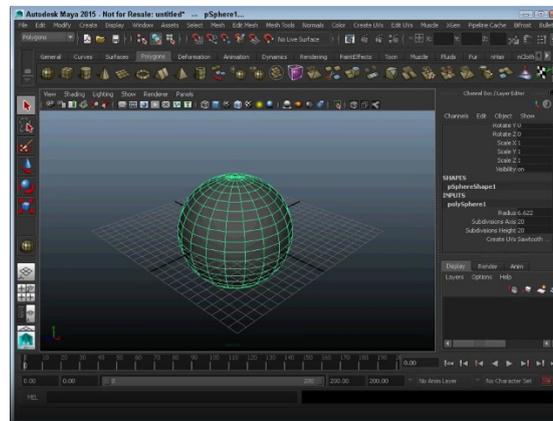
Ordinateur personnel (PC)

La plupart des tâches de manipulation 3D sont aujourd'hui réalisées **sur PC**.

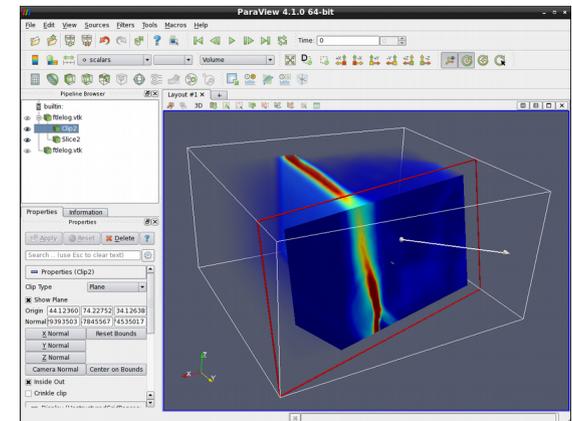
- Principaux logiciels de CAO :
 - SolidWorks, Fusion360, AutoCAD...
- Principaux logiciels de modélisation 3D :
 - Maya, 3DS Max, Cinema4D...
- Principaux logiciels de visualisation scientifique :
 - ParaView, MATLAB, IDL...



SolidWorks



Maya

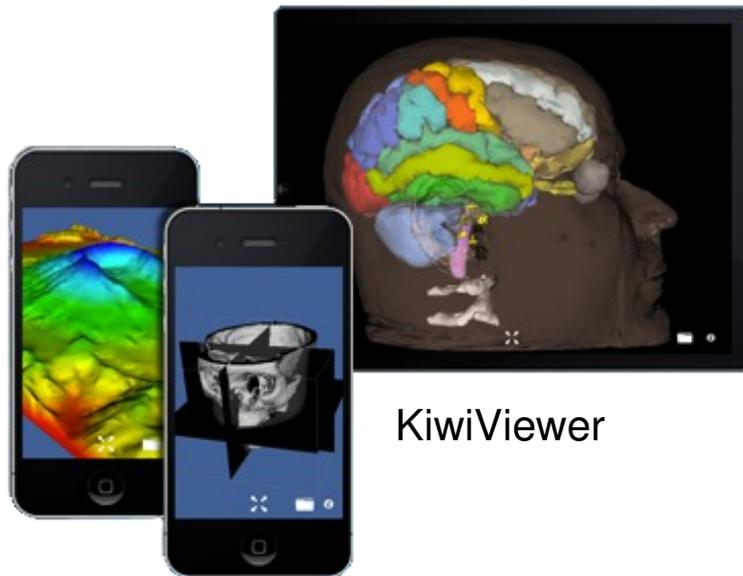


ParaView

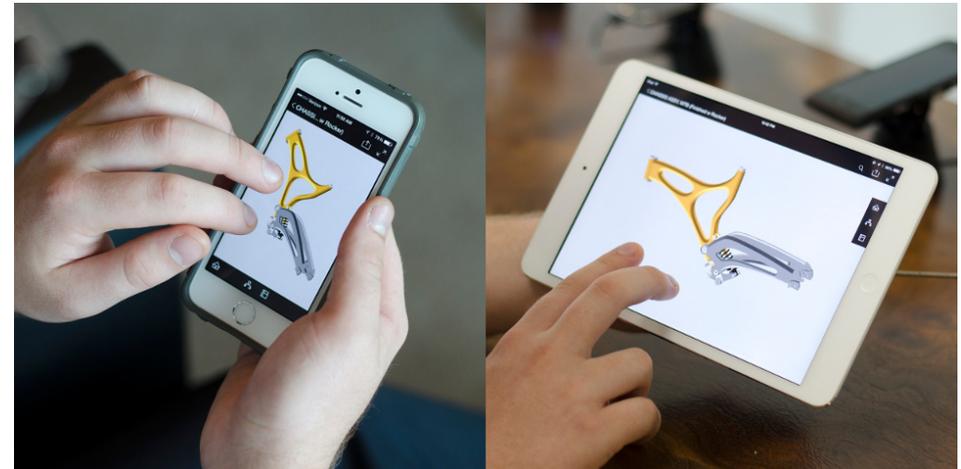
Appareils mobiles (smartphones, tablettes...)

- Capacités 3D en constante augmentation
- Portage de logiciels majeurs :
 - Fusion360
 - KiwiViewer (apparenté à ParaView)
- Taux d'utilisation des tablettes en CAO [1] :
5% en 2015, 19% prévus en 2018–2020

Progression de la manipulation 3D
sur plate-forme mobile.



KiwiViewer



Fusion360

Limitations des plate-formes PC et mobile

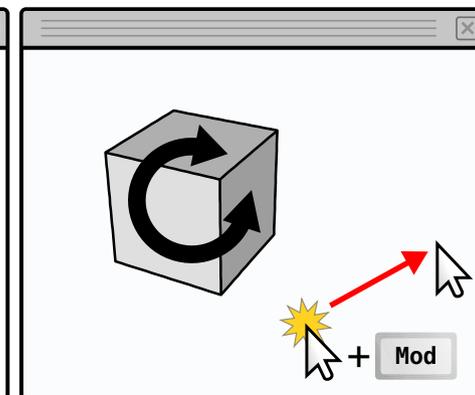
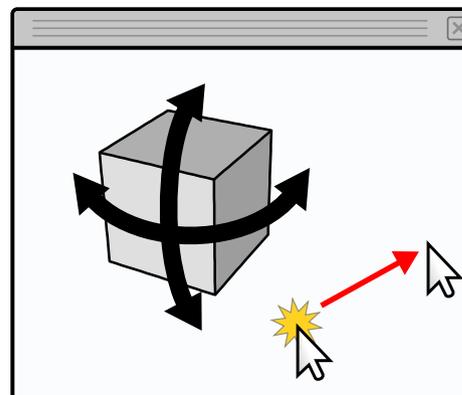
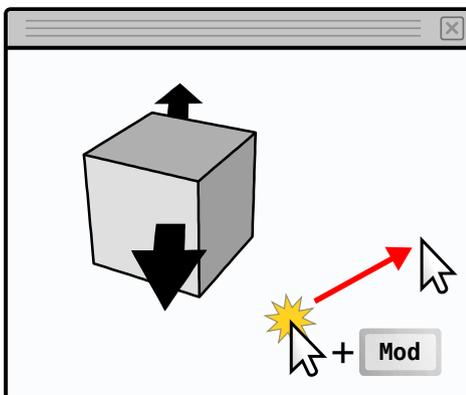
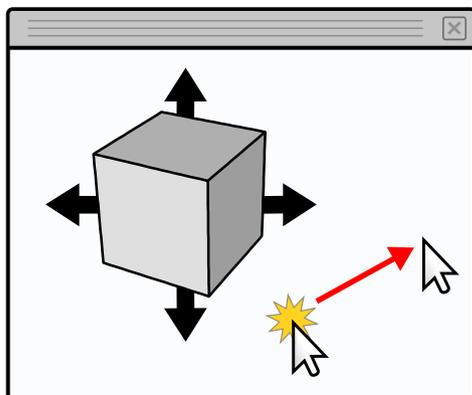
- Ces plate-formes sont avant tout **conçues pour l'interaction 2D** :

- PC : clavier + souris
- mobile : écran tactile



⇒ Contrôle insuffisant des 6 degrés de liberté nécessaires à la manipulation 3D

⇒ Nécessité de décomposer la manipulation en sous-étapes de 2 DdL, ce qui **complexifie et ralentit la manipulation**

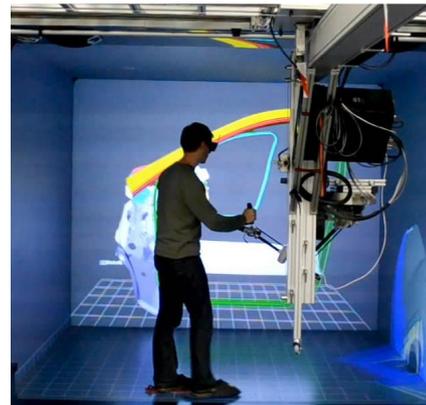
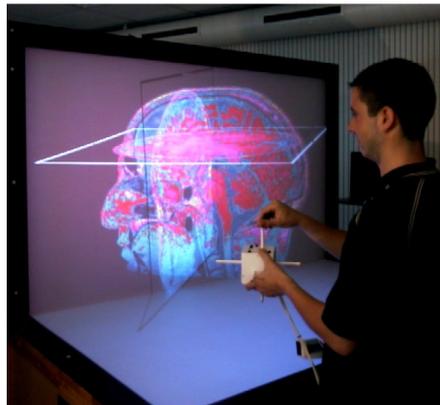


Systemes de réalité virtuelle

- La réalité virtuelle place l'utilisateur dans le même espace que les objets   manipuler
⇒ **Facilite** la manipulation 3D



Pourquoi ces systèmes sont-ils alors **moins utilisés** que le PC et le mobile pour la manipulation d'objets 3D ?



Portabilité

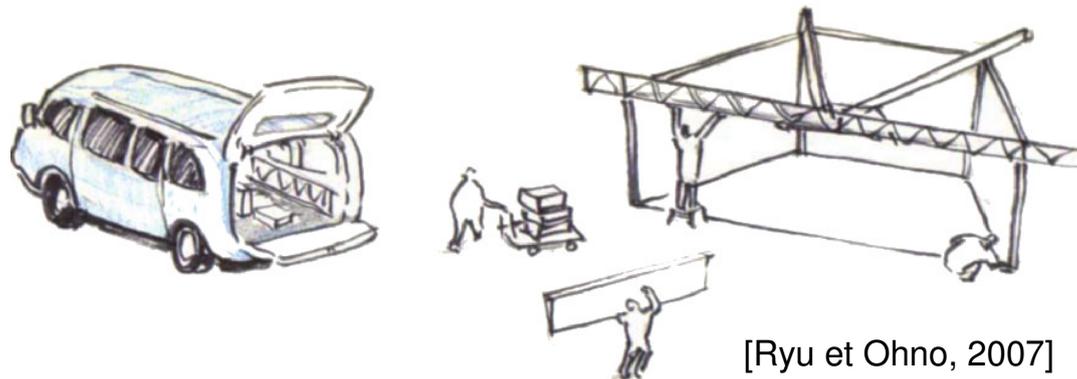
Installations fixes et volumineuses = manque de **portabilité**

- ✗ Impossible d'en équiper chaque poste de travail :
 - un seul exemplaire généralement disponible
 - les utilisateurs doivent en partager l'usage
- ✗ Impossible de poursuivre l'utilisation chez soi ou en déplacement



TAN VR-Cube

Portabilité : capacité de pouvoir transporter le système et de pouvoir l'utiliser pendant son déplacement sans phase d'installation préalable.



[Ryu et Ohno, 2007]

Intrusivité

Obligation pour l'utilisateur de porter des dispositifs spécifiques
= **intrusivité**

- ✗ Besoin d'être équipé avant de pouvoir utiliser l'interface
- ✗ Inconfort associé à de tels dispositifs :
 - coupure avec le monde réel (visiocasques, gants...)
 - ancrage à un point fixe (structures mécaniques...)
 - poids non négligeable



[Sutherland, 1968]

Non-intrusivité : ne pas obliger l'utilisateur à porter d'équipement le coupant du monde réel et/ou limitant sa liberté de mouvement.



NASA VIVED

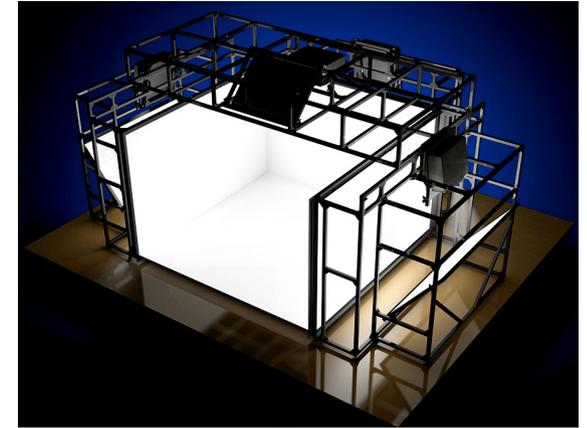


VPL DataGlove

Accessibilité

Utilisation d'équipements peu répandus et onéreux
= faible **accessibilité**

- ✗ Technologies spécifiques et avancées
- ✗ Difficultés pour les utilisateurs à accéder au matériel requis



TechViz « CAVE » : 400 000 €

Accessibilité : capacité d'un système à fonctionner sur du matériel déjà largement répandu, et/ou de coût raisonnable.



« ImmersaDesk R2 » : 150 000 \$

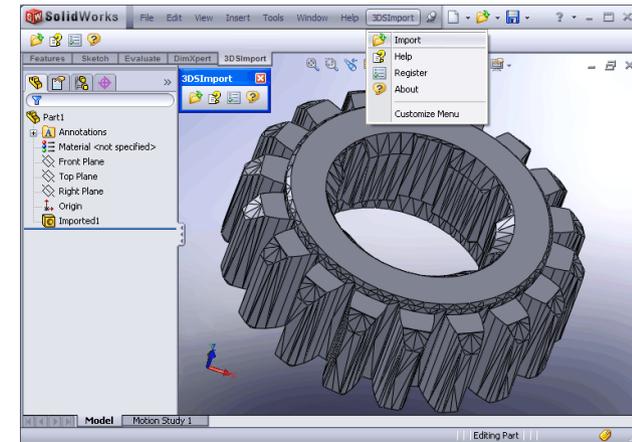


« Responsive Workbench » : 60 000 \$
« Cubic Mouse » : 5 000 \$

Constat actuel

- La manipulation 3D se fait encore majoritairement sur PC, et de plus en plus sur appareil mobile
- Mais ces plate-formes, conçues pour l'interaction 2D, sont **peu adaptées** à la manipulation 3D

- La réalité virtuelle serait mieux adaptée pour cette tâche
- Mais les systèmes actuels présentent certaines contraintes :
 - manque de portabilité
 - intrusivité
 - faible accessibilité
- Ces contraintes font que ces systèmes restent **sous-utilisés** en pratique pour des tâches courantes



Objectif de la thèse

L'objectif de cette thèse est donc le suivant :

Proposer de **nouvelles approches** d'interfaces visant à être **plus portables**, **moins intrusives** et **plus accessibles** que les systèmes actuels de réalité virtuelle, tout en conservant leurs avantages pour la manipulation 3D.

Solutions étudiées

- 1) Manipulation par objets tangibles sur appareil mobile
- 2) Perception de forces en l'absence de dispositifs actifs
- 3) Appareil mobile comme support de manipulation
- 4) Le « volume tangible » : un dispositif portable et intégré

► **Manipulation par objets tangibles sur appareil mobile**

Perception de forces en l'absence de dispositifs actifs

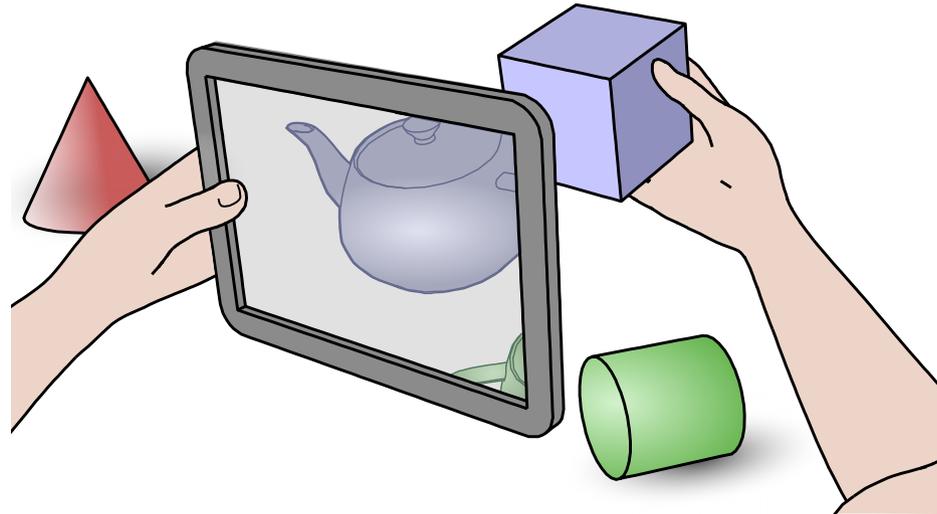
Appareil mobile comme support de manipulation

Le « volume tangible » : un dispositif portable et intégré

Concept proposé [Issartel et al., VRST 2014]

Combiner un **appareil mobile** avec des **objets tangibles** (passifs)

- « fenêtre » de réalité augmentée
- objets tangibles couplés aux objets virtuels
- interaction derrière l'écran, dans l'espace réel



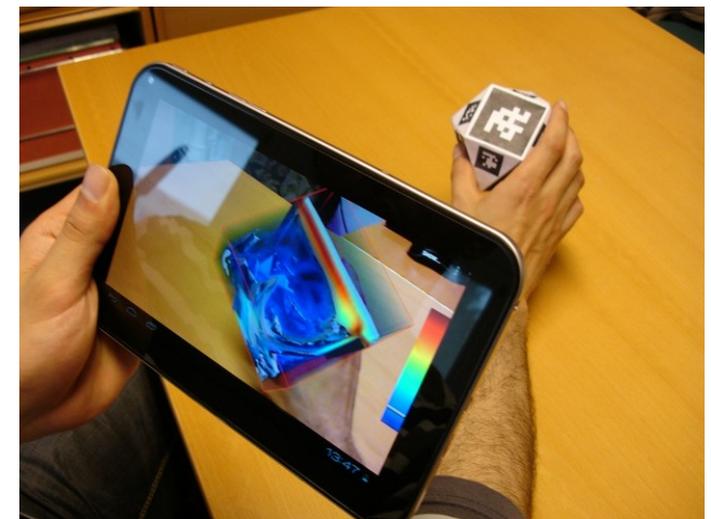
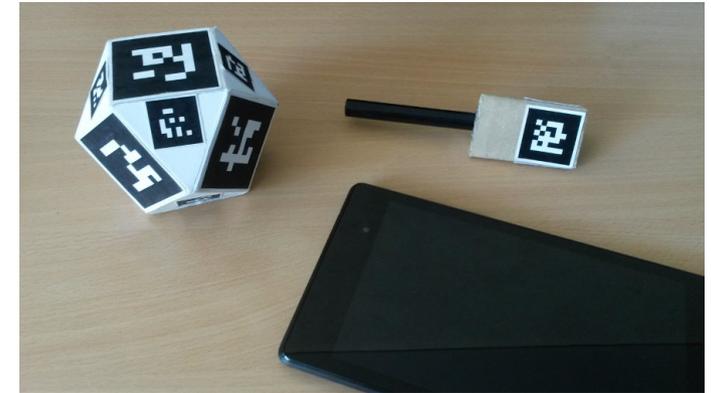
- Appareil mobile :
 - ✓ portabilité
 - ✓ accessibilité (matériel répandu)
 - ✗ manipulation 6 DdL

- Objets tangibles passifs :
 - ✓ manipulation 6 DdL
 - ✓ non-intrusivité
 - ✓ accessibilité (faible coût)

Implémentation

- Principaux défis :
 - portabilité : pas de système de suivi 3D externe
 - accessibilité : pas d'équipements autres que ceux d'un appareil mobile classique

- **Tablette 7" standard** avec caméra arrière
- **Suivi optique** par la caméra arrière
- Objets tangibles munis de **marqueurs**
 - marqueurs multiples permettant de maintenir le suivi au cours de la manipulation



Application à l'exploration de données



Première étude : manipulation 3D

Objectif : vérifier la pertinence de l'interaction tangible pour la manipulation 3D sur appareil mobile

Tâche :

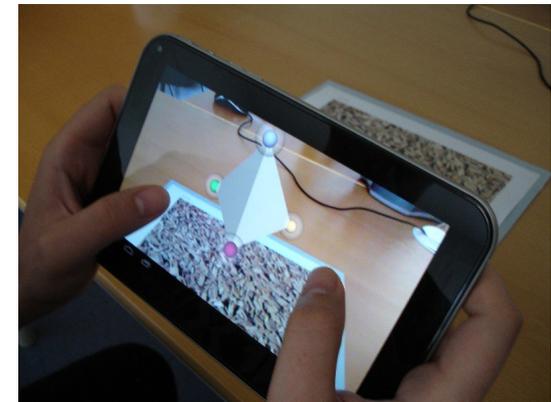
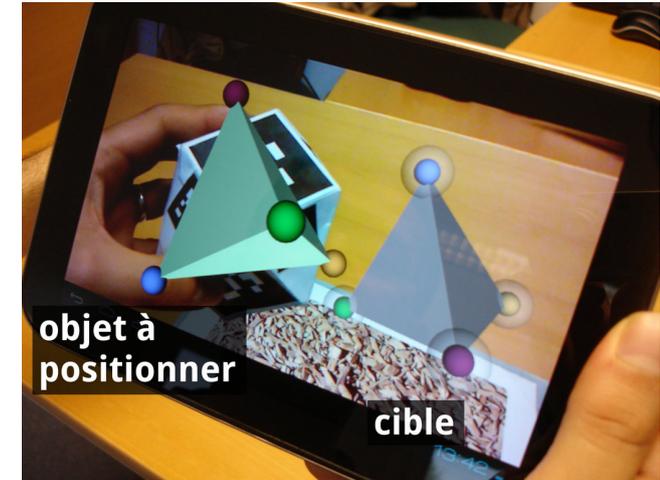
Amener un objet virtuel à une position et orientation donnée [Zhai *et al.*, 1998]

Conditions :

- objet tangible
- écran tactile (modalité standard sur mobile)
- souris 3D (dispositif conçu pour l'interaction 6 DdL)

Hypothèses :

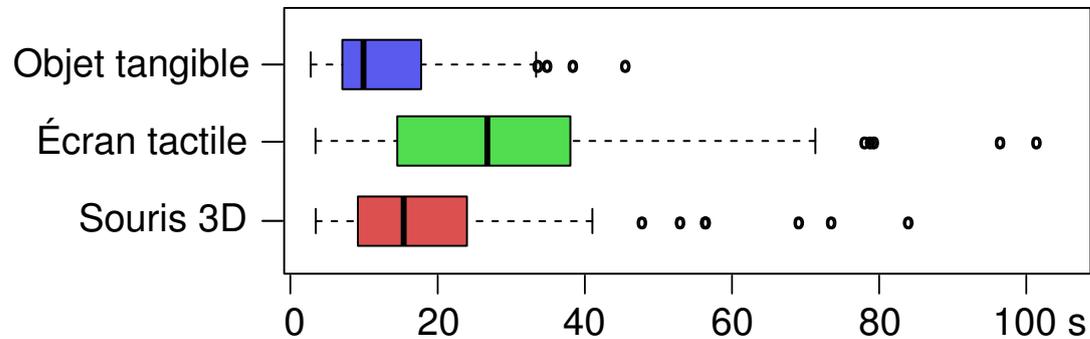
- la condition tangible est plus performante que la condition tactile pour cette tâche
- la condition tangible est au moins comparable à la condition souris 3D



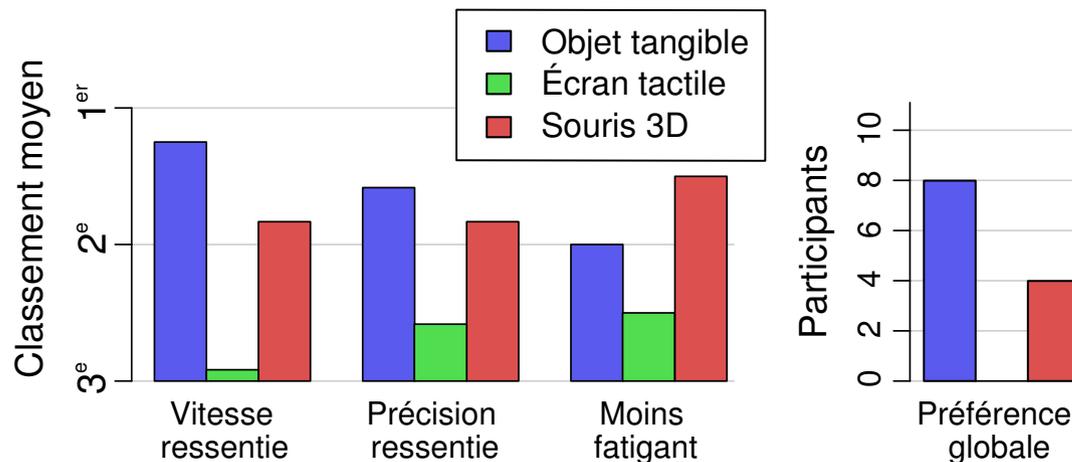
Première étude : manipulation 3D

Résultats :

12 participants (= 288 essais)



La condition tangible est **plus performante** (en terme de temps d'accomplissement) que les autres conditions pour cette tâche.



La condition tangible est **préférée** aux autres techniques, mais est aussi **plus fatigante** que la condition souris 3D.

L'interaction par objets tangibles est donc :

- plus performante que la modalité traditionnelle sur mobile (tactile) pour la manipulation 3D
- plus performante qu'un dispositif dédié à l'interaction 6 DdL (souris 3D)

Deuxième étude : plans de coupe

Objectif : évaluer l'interaction tangible pour une tâche plus complexe, la manipulation de plans de coupe

Tâche :

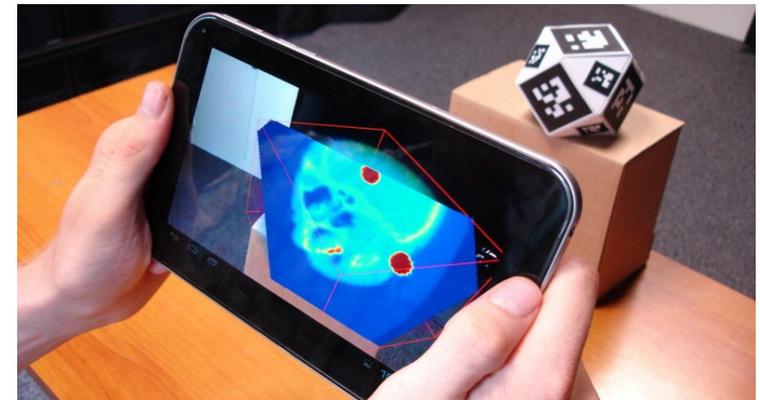
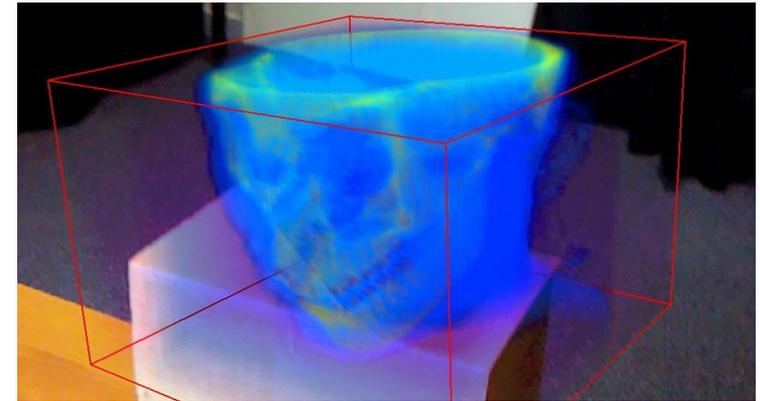
- 1) rechercher trois cibles dans un volume
- 2) positionner le plan de coupe à travers les trois cibles

Conditions :

- plan de coupe contrôlé par le stylet
- plan de coupe contrôlé par la tablette
- plan de coupe contrôlé par une souris 2D
(condition de comparaison, inspirée de ParaView)

Hypothèse :

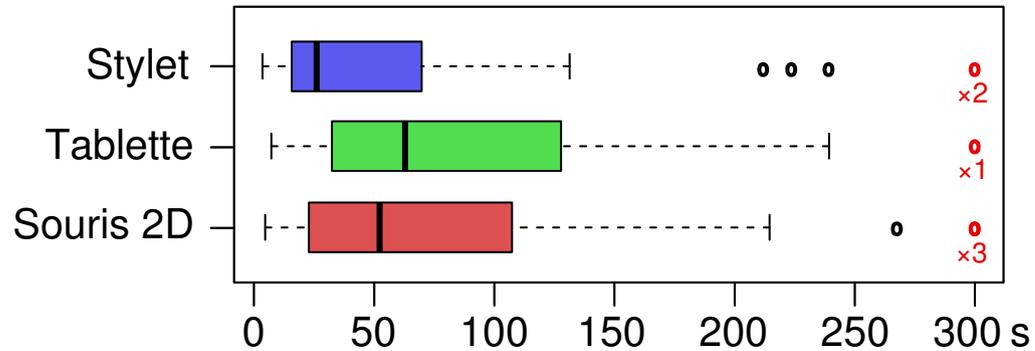
- les deux conditions tangibles (stylet et tablette) sont plus performantes que la condition de comparaison (souris 2D) pour cette tâche



Deuxième étude : plans de coupe

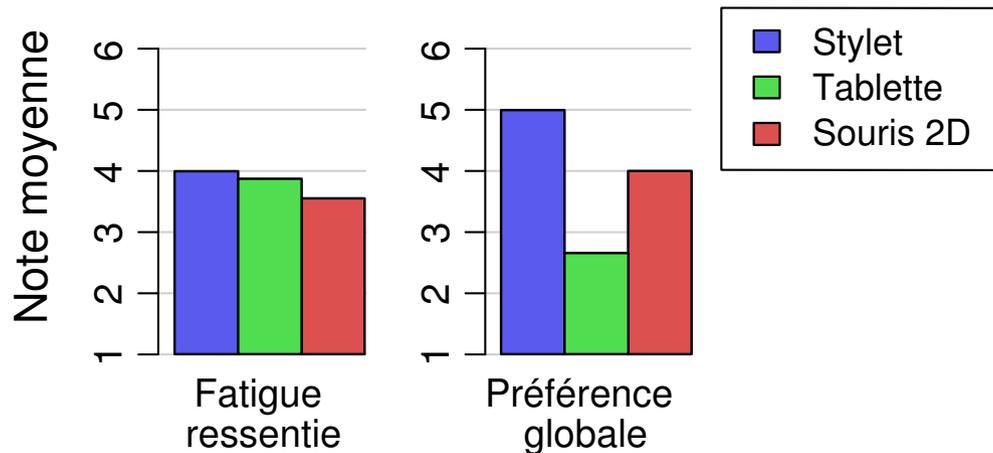
Résultats : [Issartel *et al.*, 3DUI 2014]

9 participants (= 162 essais)



La condition stylet est **plus performante** pour cette tâche.

Mais la condition tablette **n'a pas surpassé** la condition souris 2D.



La condition stylet est préférée aux autres conditions.

La fatigue ressentie est comparable dans les trois cas.

Observations tirées de cette expérience :

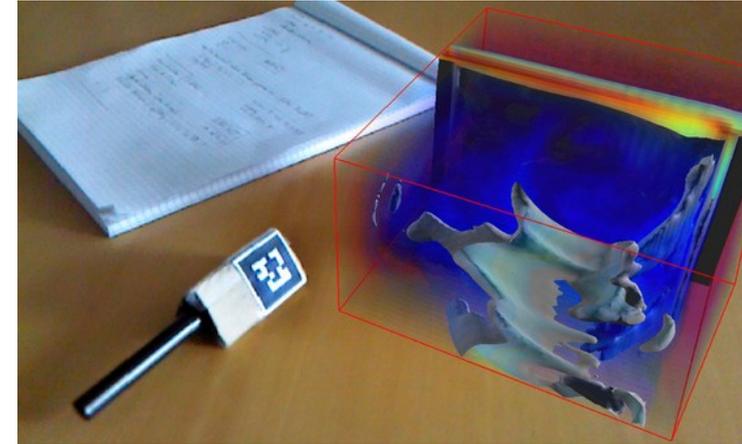
- la manipulation tangible *via* le stylet montre ici encore son intérêt
- mais l'utilisation de la tablette comme objet tangible a posé des problèmes aux participants

Appareil mobile et objets tangibles : conclusions

La combinaison d'un appareil mobile classique avec des objets tangibles passifs permet d'obtenir une interface à la fois **portable**, **non-intrusive** et **accessible**.

Expérimentalement, cette approche est :

- **au moins aussi performante** pour la manipulation 3D qu'un dispositif 6 DdL dédié
- **plus performante** que les dispositifs les plus utilisés actuellement (souris 2D, écran tactile)



Limitations :

- Interface constituée de multiples éléments (appareil mobile + objets tangibles)
 - entrave à la portabilité
 - risque de perte d'un objet
 - problèmes ergonomiques durant la manipulation
- Absence de retour de force
 - objets tangibles passifs (et portables)
 - désavantage par-rapport aux interfaces de réalité virtuelle

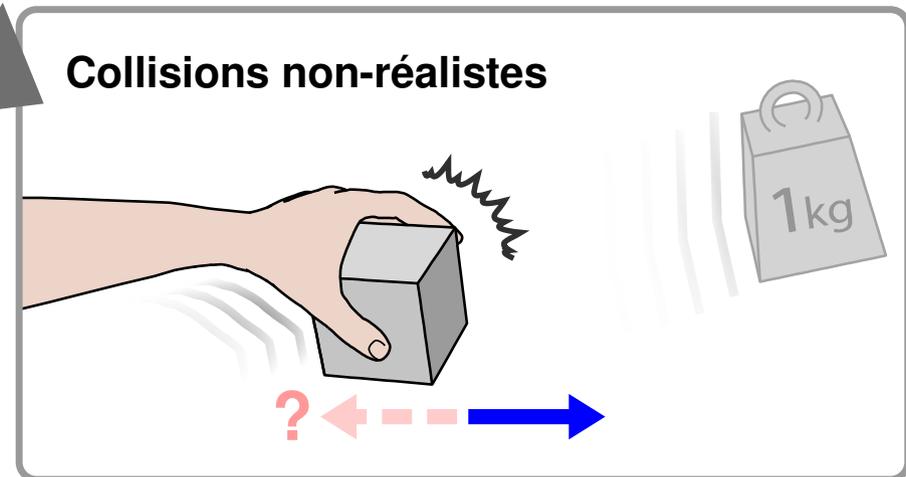
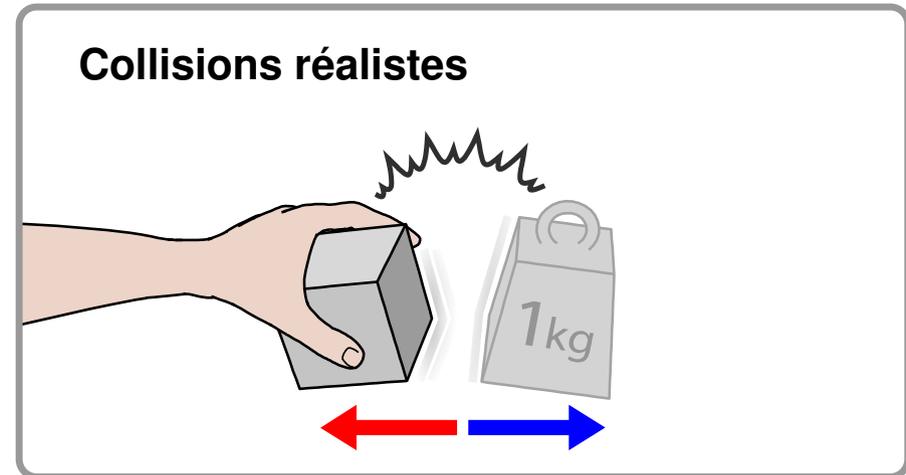
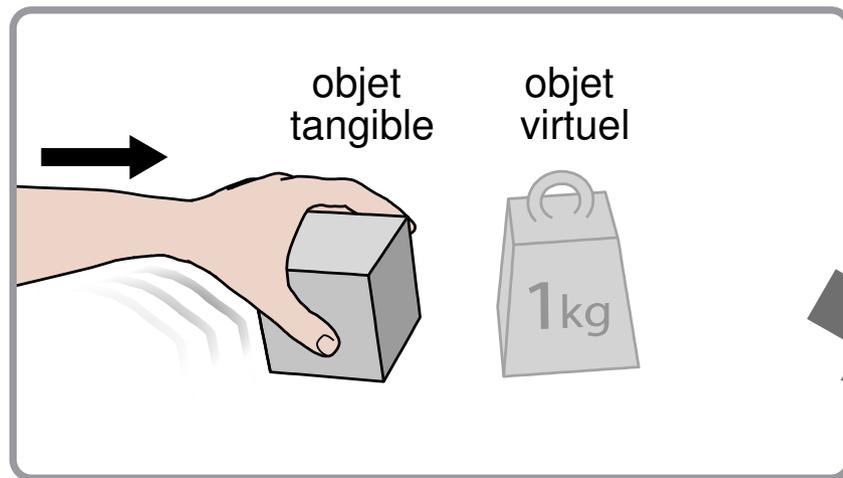
Manipulation par objets tangibles sur appareil mobile

► **Perception de forces en l'absence de dispositifs actifs**

Appareil mobile comme support de manipulation

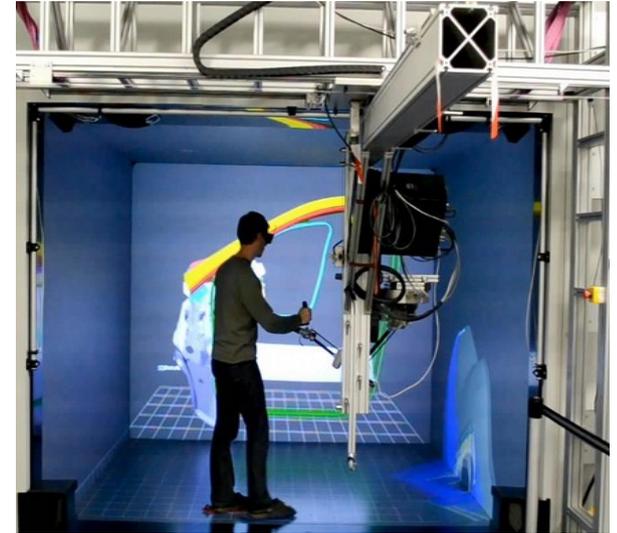
Le « volume tangible » : un dispositif portable et intégré

Interaction physique avec des objets virtuels

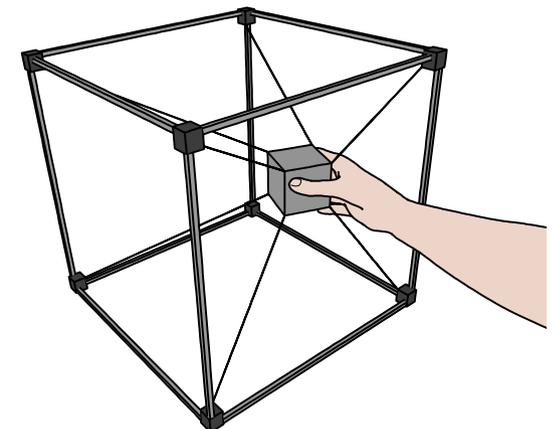


Dispositifs actifs à retour de force

- Couramment employés en réalité virtuelle
- Mais **incompatibles** avec nos objectifs :
 - encombrement, points de fixation ⇒ non-portabilité
 - appareillage sur l'utilisateur ⇒ intrusivité
 - coût important ⇒ faible accessibilité

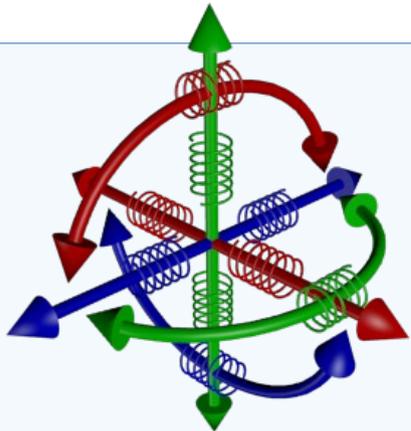
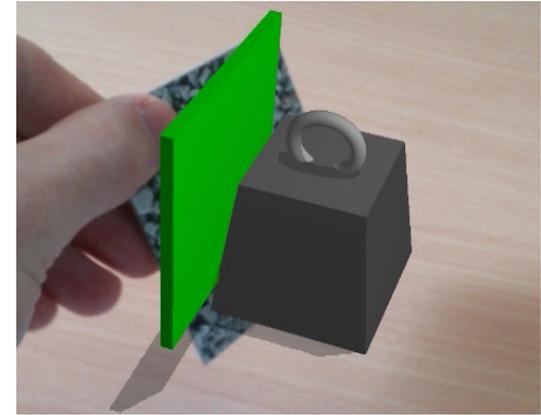


Comment recréer un retour de force avec des objets tangibles **passifs**, sans recourir à des dispositifs actifs ?



« Découplage » visuel

- Un objet tangible passif ne peut réellement être affecté par des forces virtuelles, **mais son double virtuel peut !**
- Découplage entre l'objet tangible et l'objet virtuel associé
 - les deux restent liés, sans être strictement couplés
- Retour de force à travers un effet purement visuel
 - principe du « pseudo-haptique » [Lécuyer, 2009]
 - élimine le recours à des dispositifs actifs



Implémentation

- Contrainte de ressort 6 DdL
 - k : raideur en traction (translation)
 - κ : raideur en torsion (rotation)

$$\vec{F} = -k\vec{d} + -c_c\vec{v}$$

$$\vec{\tau} = -\kappa\vec{\theta} + -C_c\vec{\omega}$$

Première étude : tri d'objets par masse

Objectif : vérifier que la technique de « découplage » permet effectivement de percevoir des forces virtuelles sans dispositif actif

Tâche :

Trier des objets virtuels (visuellement identiques) en fonction de leur masse

Conditions :

- avec découplage
- sans découplage (condition de contrôle)

Hypothèses :

- la découplage permet de percevoir et de différencier des masses virtuelles
- le découplage est efficace sans entraînement préalable



Première étude : tri d'objets par masse

Résultats : [Issartel *et al.*, VR 2015]

13 participants

Essai initial (avec découplage, sans entraînement préalable)

- 2 cubes virtuels (15 g / 800 g), visuellement identiques
- objectif : identifier l'objet le plus lourd
- résultat : **100%** de réussite



10 essais suivants (dont 5 avec découplage)

- 3 cubes virtuels (15 g / 200 g / 800 g), visu. identiques
- objectif : trier les cubes selon leur masse
- résultats :
 - sans découplage : 6,2% de réussite ($\sigma = 9,6$)
 - avec découplage : **78,5%** de réussite ($\sigma = 20,8$)



Deuxième étude : seuil différentiel

Objectif : mesurer la plus petite différence de masse (seuil différentiel) pouvant être perçue avec la technique de découplage

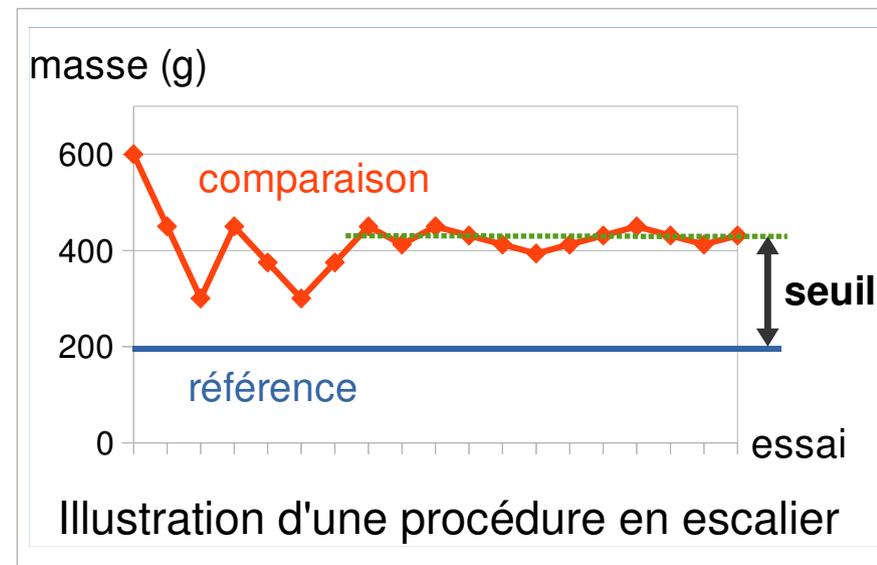


Le seuil différentiel dépend des paramètres de découplage

- 2 cubes virtuels, visuellement identiques :
 - masse de **référence** (15 g / 200 g / 800 g)
 - masse de **comparaison** (variable)
- Procédure « en escalier » ^[1]

Résultats : [Issartel *et al.*, VR 2015]

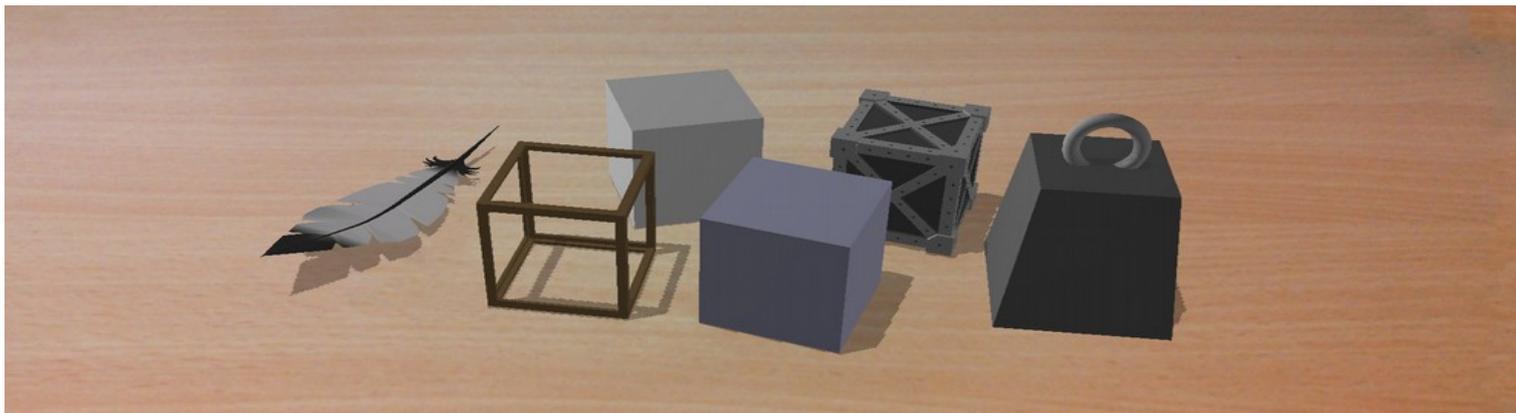
- réf. 15 g : **172,3 g** ($\sigma = 72,4$)
- réf. 200 g : **271,5 g** ($\sigma = 155,3$)
- réf. 800 g : **696,2 g** ($\sigma = 394,7$)



[1] « Staircase procedure »

Perception de forces : conclusions

- Technique de « découplage »
 - perception de force à travers la **seule modalité visuelle** (pseudo-haptique)
 - **élimine le besoin de dispositifs actifs**
 - **immédiatement efficace** sans entraînement préalable
- Simplicité d'implémentation
 - contrainte de ressort 6 DdL
- Caractérisation de cette technique : seuil différentiel
 - améliorations possibles pour réduire ce seuil :
 - ajustement des paramètres
 - autres formes de retour :
déformation souple, changement de couleur, sonification...



Manipulation par objets tangibles sur appareil mobile

Perception de forces en l'absence de dispositifs actifs

► **Appareil mobile comme support de manipulation**

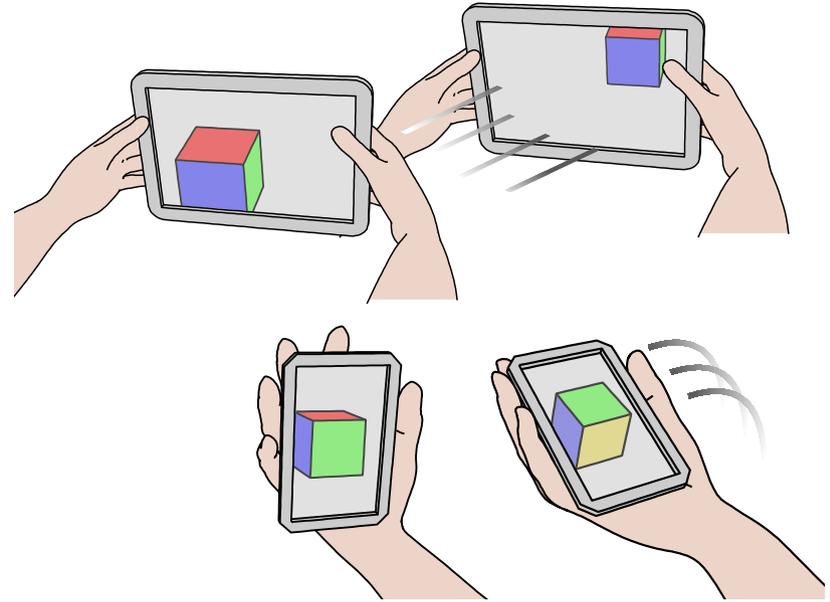
Le « volume tangible » : un dispositif portable et intégré

Concept étudié

Utiliser les **déplacements de l'appareil mobile** lui-même pour manipuler des objets 3D affichés **sur son propre écran**.

- Interface entièrement intégrée dans un seul élément
✓ meilleure portabilité

- Particularité : écran = dispositif d'entrée
 - configuration « localement couplée »
[Rahman *et al.*, 2009]



- Trois principales questions :
 - 1) Compatibilité spatiale :
cohérence entre les mouvements apparents des objets et ceux de l'appareil mobile
 - 2) Espace de manipulation :
comment éviter ou retarder la perte du retour visuel ?
 - 3) Référentiel de manipulation :
« poignée » ou « fenêtre » ? (allocentrique vs. égocentrique)

Fonctions de transfert (*mappings*)

- Contrôle en position / en vitesse [Zhai, 1995]
- Mapping relatif / absolu [Poupyrev *et al.*, 2000]
- Fonction de gain : $k_t = \text{gain}(t)$

- Formalisation des principales fonctions de transfert

Contrôle en position absolu

$$\Delta pos = rot_0^{-1} [(pos_t - pos_0) \times k_t] rot_0$$

$$\Delta rot = rot_0^{-1} [(rot_t - rot_0)^{k_t}] rot_0$$

$$objpos = \Delta pos + objpos_0$$

$$objrot = \Delta rot + objrot_0$$

Contrôle en position relatif

$$\Delta pos = rot_{t-1}^{-1} [(pos_t - pos_{t-1}) \times k_t] rot_{t-1}$$

$$\Delta rot = rot_{t-1}^{-1} [(rot_t - rot_{t-1})^{k_t}] rot_{t-1}$$

$$objpos = \Delta pos + objpos_{t-1}$$

$$objrot = \Delta rot + objrot_{t-1}$$

Contrôle en vitesse

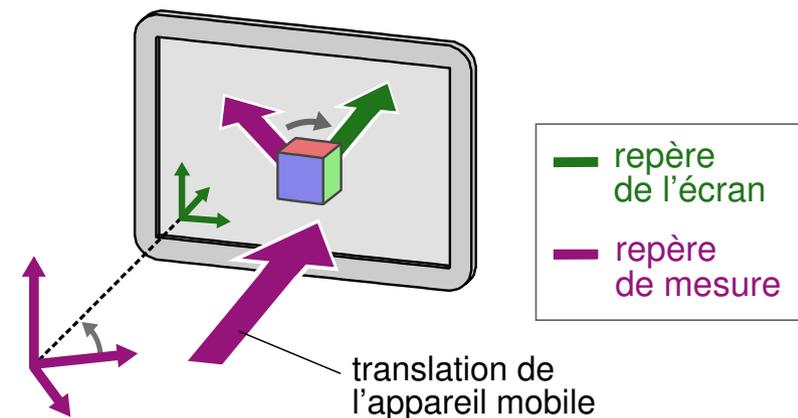
$$\Delta pos = rot_0^{-1} [(pos_t - pos_0) \times k_t] rot_0$$

$$\Delta rot = rot_0^{-1} [(rot_t - rot_0)^{k_t}] rot_0$$

$$objpos = \Delta pos + objpos_{t-1}$$

$$objrot = \Delta rot + objrot_{t-1}$$

- Adaptation nécessaire des mappings classiques pour cette configuration localement couplée



Compatibilité spatiale

- **Compatibilité directionnelle** [Bowman *et al.*, 2004] :
 - l'objet manipulé se déplace dans la même direction (même axe) que l'appareil mobile
- **Transitivité** + remise à zéro [Bade *et al.*, 2005] :
 - mouvement $A \rightarrow B \rightarrow C$ équivalent à mouvement $A \rightarrow C$

	Comp. directionnelle		Transitivité	
	translations	rotations	translations	rotations
Absolu	✗	si gain = -1	✓	✓
Relatif	✓	✓	✗	si gain = -1
Vitesse	✗	✗	✗	✗

- Aucun des mappings étudiés ne garantit les deux propriétés en toutes circonstances
- Compromis nécessaire entre compatibilité directionnelle et transitivité

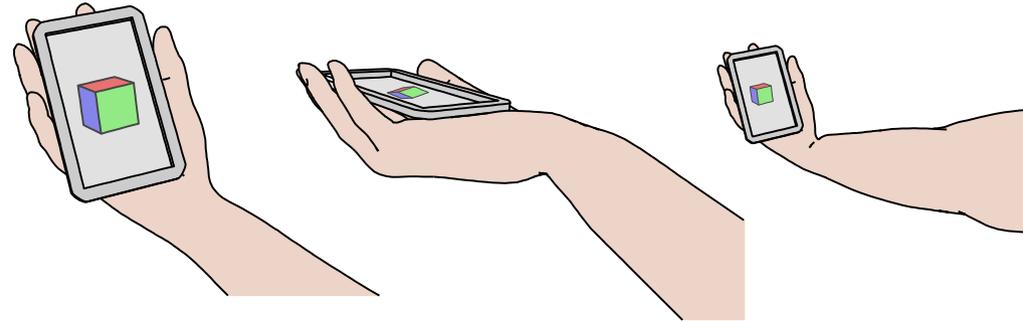
Espace de manipulation

Problème : l'écran s'éloigne et s'incline au cours de la manipulation

- ⇒ risque de perte du retour visuel
- ⇒ restriction de l'espace de manipulation

Solutions possibles

- Contrôle en vitesse
 - mauvaise compatibilité spatiale
 - pas de mécanisme de recentrage
- Débrayage (« *clutching* »)
 - fatigue de l'utilisateur
- Gain constant > 1
 - perte en précision
- Gain dynamique



Gain fonction de la distance

$$\text{dist}(t_1, t_2) = \begin{cases} \|pos_{t_1} - pos_{t_2}\| \\ \text{angle}(rot_{t_1}, rot_{t_2}) \end{cases}$$

$$\text{gain}(t) = a + b \text{dist}(t, 0)^c$$

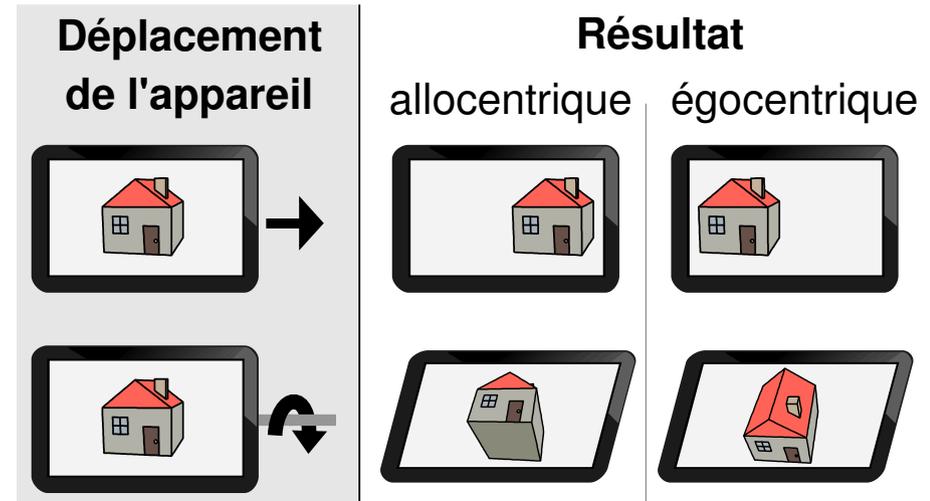
Gain fonction de la vitesse

$$\text{gain}(t) = a + b \left(\frac{\text{dist}(t, t-1)}{\Delta t} \right)^c$$

Référentiel allocentrique / égocentrique

Deux interprétations possibles des mouvements de l'appareil mobile :

- « poignée » contrôlant les objets manipulés
 - interprétation **allocentrique**
- « fenêtre » contrôlant le point de vue
 - interprétation **égocentrique**



Objectif : déterminer à quel comportement s'attendent les utilisateurs

Tâche :

Obtenir le « résultat demandé » sur l'écran

Conditions :

- mapping allocentrique
- mapping égocentrique

Mesures :

- note subjective, « naturel » ou « non naturel » (échelle de 1 à 4)



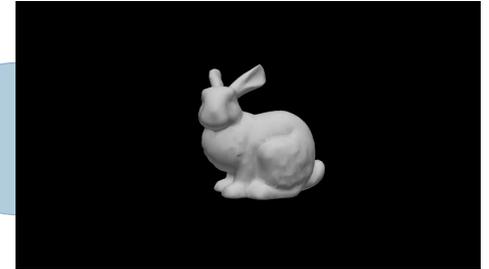
Référentiel allocentrique / égocentrique

Résultats : [Issartel *et al.*, SUI 2016]

30 participants

- **Préférence de base** (scène neutre, première utilisation) :
 - en translation : égocentrique
 - en rotation : allocentrique
- **Préférence sur 6 DdL** (translations + rotations) :
 - un mapping entièrement égocentrique est préférable
 - influence dominante du mapping en translation
- **Indices contextuels :**
 - type d'objet manipulé (scène 2) : non déterminant
 - objet vu de l'intérieur (scène 3) : nette préférence pour un comportement égocentrique
 - objet dans un environnement fixe (scène 4) : pas de préférence pour un comportement allocentrique

1



2



3



4



Appareil mobile seul : conclusions

- Intérêt de cette approche :
 - ⇒ l'interface entière est intégrée dans l'appareil mobile
 - ⇒ amélioration de la **portabilité**
- Mais particularités dues au couplage entre l'écran et le support de manipulation (« couplage local ») :
 - compatibilité spatiale pas toujours garantie
 - risques d'interruption du retour visuel
 - ambiguïté allocentrique / égocentrique
- Plusieurs solutions ont été proposées, mais elles impliquent des compromis



- Question : peut-on retrouver les avantages de la manipulation par objets tangibles, mais dans une interface entièrement intégrée ?

Manipulation par objets tangibles sur appareil mobile

Perception de forces en l'absence de dispositifs actifs

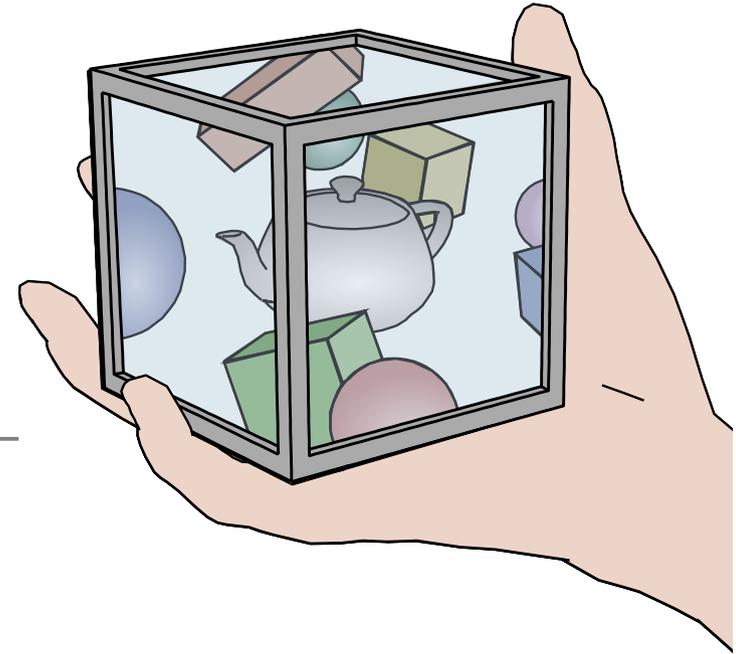
Appareil mobile comme support de manipulation

► **Le « volume tangible » : un dispositif portable et intégré**

Concept proposé [Issartel *et al.*, ISMAR 2016]

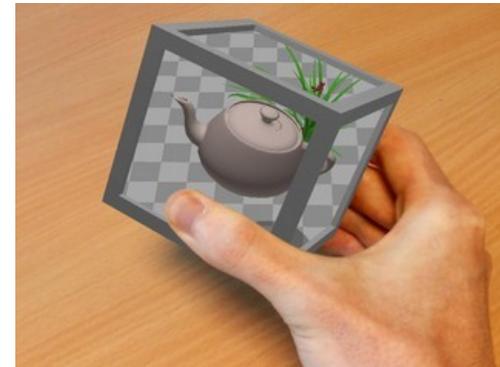
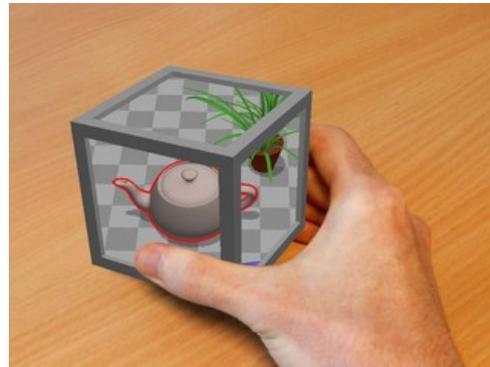
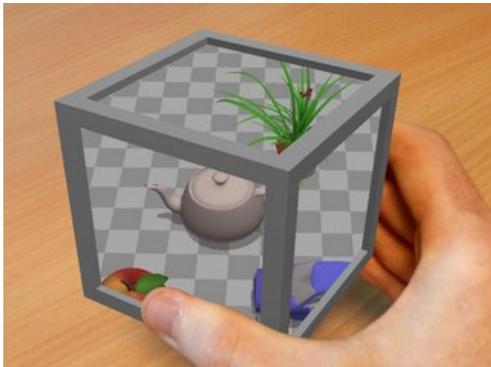
Le « volume tangible »

- Objet tangible unique
- Surface recouverte d'écrans
- Rendu « *fish-tank* » de l'environnement virtuel, s'affichant dans le volume



Sélection et manipulation : métaphore de « saisie »

- 1) Positionner le volume tangible autour d'un objet virtuel
- 2) Exercer et maintenir une pression des doigts
- 3) L'objet virtuel peut dès lors être manipulé par l'intermédiaire du volume

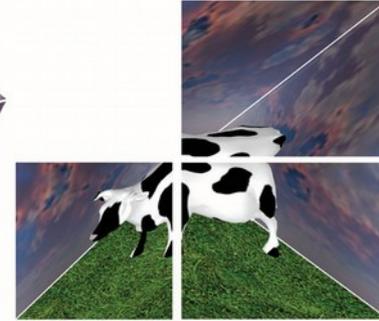
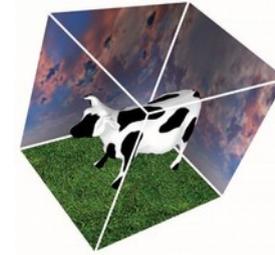


⇒ Reproduit le principe de la manipulation tangible, mais avec un seul objet

Faisabilité

Affichage sur un dispositif volumique :

- principe des « écrans géométriques »
- anamorphose sur chaque écran



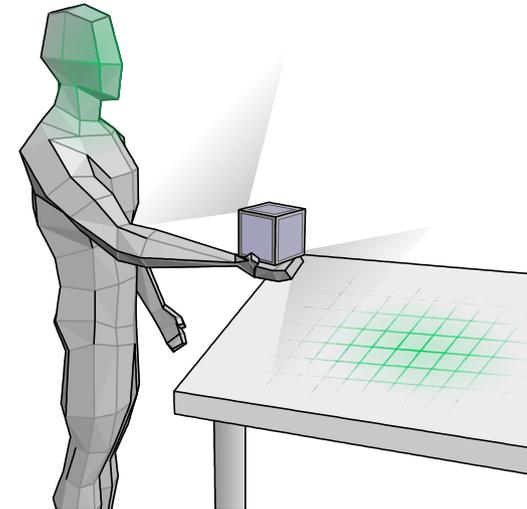
pCube [Stavness *et al.*, 2010]

Métaphore de saisie :

- capteurs de pression

Suivi 3D :

- suivi de la tête de l'utilisateur
 - nécessaire pour le rendu « *fish-tank* »
- suivi de l'environnement
 - nécessaire pour la manipulation 3D



Principaux défis :

- suivi 3D de l'environnement *et* de l'utilisateur dans un unique dispositif portable et intégré
- les technologies existent, pas le dispositif : problème d'accessibilité

Implémentation (en cours)

Processeur :

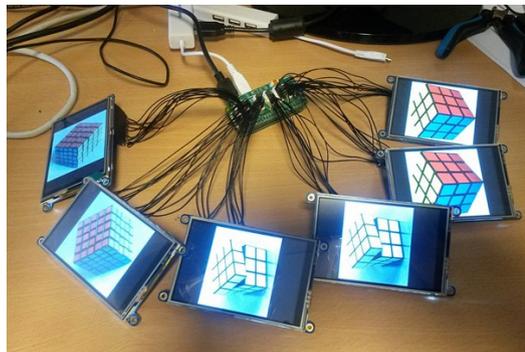
- Raspberry Pi Zero (65×30×5 mm, GPU intégré)

Écrans :

- 6× écrans tactiles résistifs (pression)
- pilotage simultané des 6 écrans
- câblés par paire : seuls 3 peuvent faire face à l'utilisateur

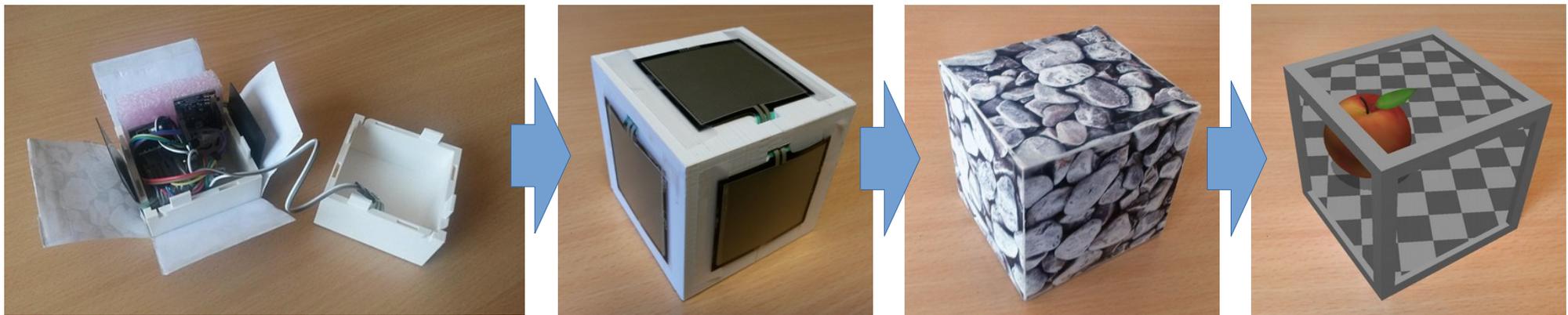
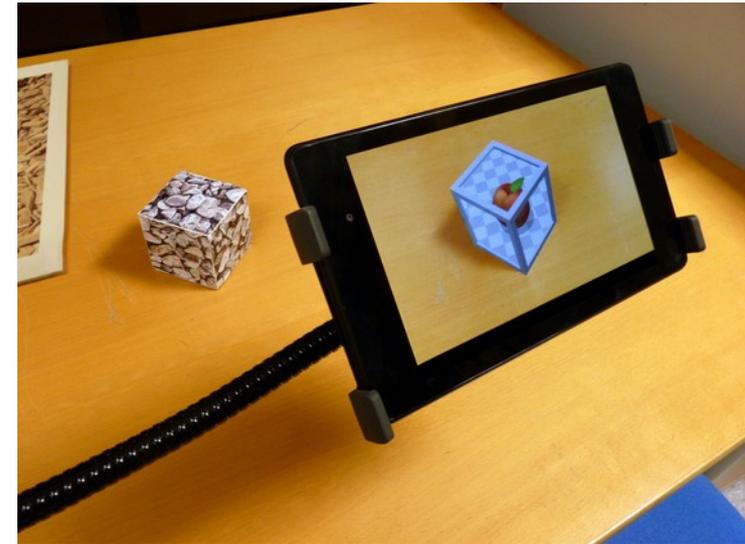
Suivi 3D :

- capteurs placés sur chaque sommet du cube
 - 8 caméras ⇒ trop coûteux en temps de calcul
 - alternative : capteurs de points infrarouge + LEDs (**portées par l'utilisateur !**)
- lentilles grand-angle (« *fisheye* ») sur chaque capteur (**angle encore insuffisant**)



Prototype partiel

- Prototype partiellement simulé en réalité augmentée
 - objet tangible et capteurs de pression : **réels**
 - écrans et suivi 3D : **simulés**
- Avantages :
 - permet de mener des études sans préoccupations d'ordre technique [Baricevic *et al.* 2012]
- Inconvénients :
 - occultation des doigts de l'utilisateur
 - dispositif de RA ne faisant pas partie du concept



Première étude : sélection et manipulation

Objectif : évaluer l'intuitivité de la métaphore de saisie et de la manipulation avec le volume tangible

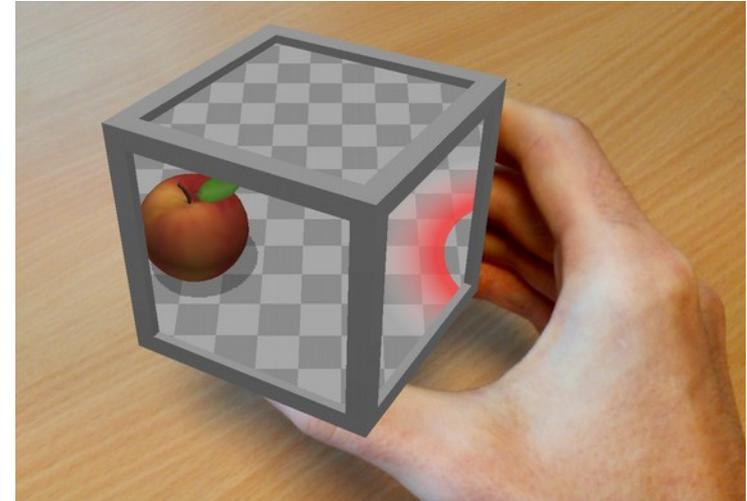
36 participants

Tâche :

Amener un objet virtuel sur une cible, sans instructions préalables (si possible)

Indices : [sur demande uniquement]

- 1) « placez le cube sur l'objet »
- 2) « appuyez les doigts sur le cube pour saisir l'objet »
- 3) « déplacez le cube tout en maintenant la pression »



Résultats :

Indices demandés	Taux de succès total
(aucun indice)	53%
1 ^{er} indice	55%
2 ^e indice	100%
3 ^e indice	N/A

- **Plus de la moitié** des participants ont pu accomplir la tâche sans aucune instruction (temps moyen : 63,5 secondes)

Deuxième étude : champ de vision

Objectif : évaluer l'impact d'un champ de vision limité à la surface du volume tangible

Tâche :

Mémorisation de la position des objets.

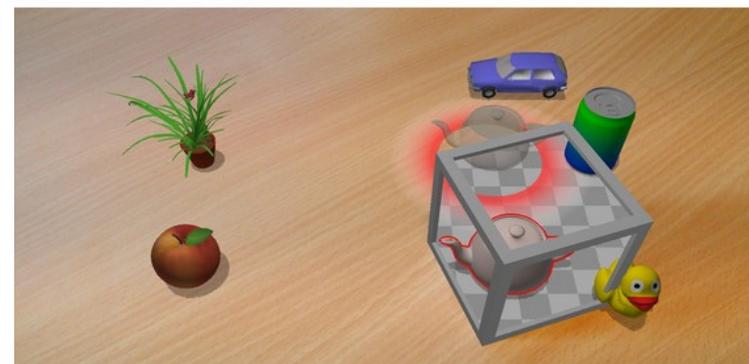
Conditions :

- champ de vision limité au volume tangible
- champ de vision étendu (simulé)

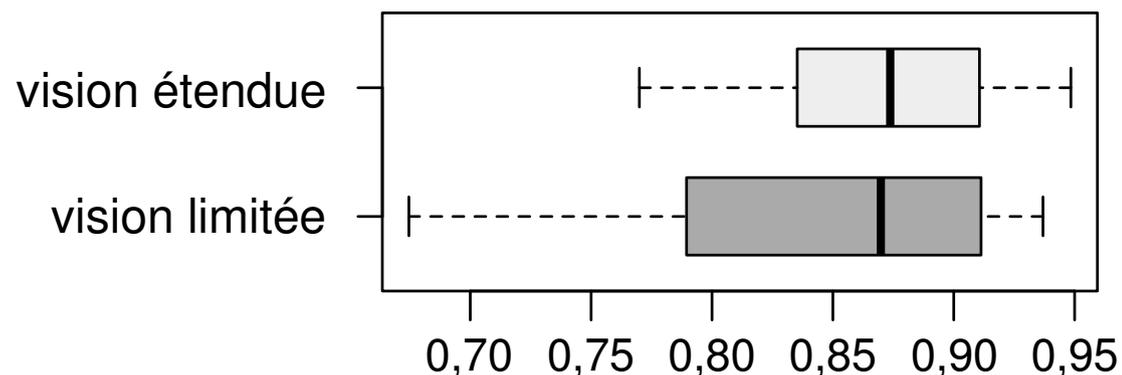
Mesures :

- métrique de distance [Sharlin *et al.*, 2009]

32 participants



Résultats :

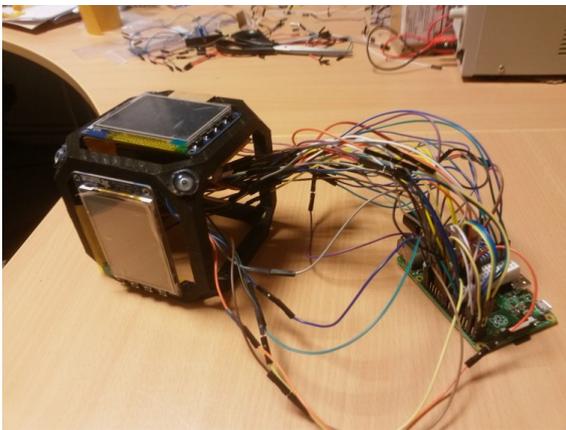
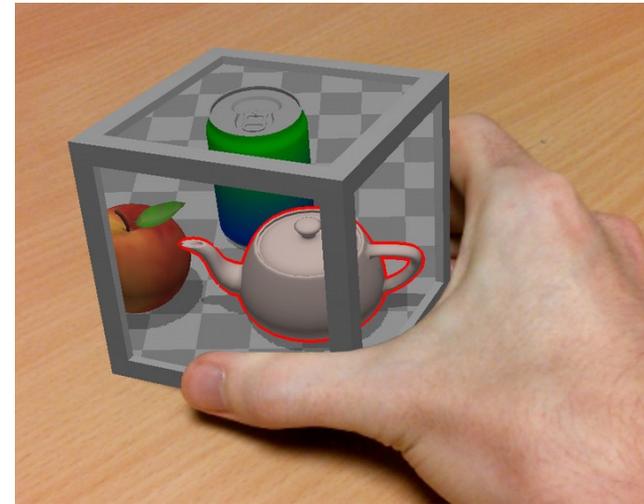


- Différence entre les moyennes : [-0,075, 0,026] à 95%

- **Pas de différence pratique** entre les deux conditions sur la mémorisation de la scène

Volume tangible : conclusions

- Une approche combinant :
 - les avantages d'un **objet tangible** pour la manipulation
 - les avantages d'un **unique dispositif intégré** pour la portabilité
- Métaphore de « saisie »
 - reproduit la manipulation d'objets réels avec les mains
 - immédiatement comprise par une majorité de participants
- Affichage déporté sur la surface du dispositif
 - ne gêne pas la perception de la scène virtuelle



Limitations :

- Complexité d'implémentation
 - Suivi 3D intégré de l'environnement *et* de l'utilisateur
 - Combinaison de technologies qui n'existe pas encore sur le marché
- ⇒ **Accessibilité inférieure** par-rapport aux approches précédentes

Conclusion générale et perspectives

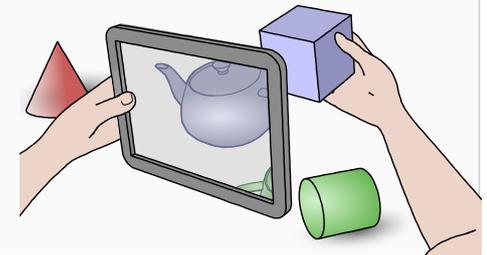
Conclusion générale

Approches étudiées :

	manipulation	portabilité	non-intrusivité	accessibilité
Appareil mobile et objets tangibles	++	+	++	++
Appareil mobile seul	+	++	++	++
Volume tangible	++	++	++	-

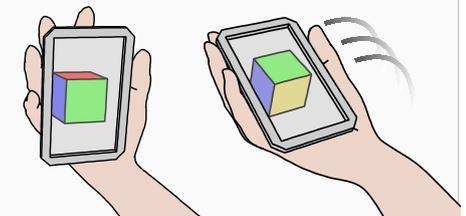
- **Appareil mobile et objets tangibles**

- ✓ manipulation 6 DdL portable, non-intrusive et accessible
- ✓ retour de force possible grâce au pseudo-haptique
- ✗ plusieurs éléments à transporter et manipuler



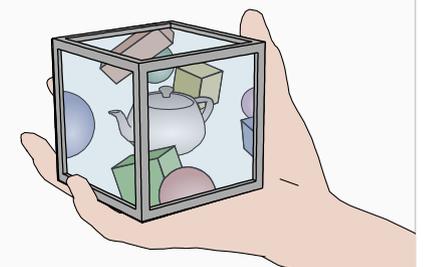
- **Appareil mobile seul**

- ✓ approche intégrée : meilleure portabilité
- ✗ complexité de manipulation dans cette configuration



- **Volume tangible**

- ✓ approche intégrée
- ✓ manipulation 6 DdL similaire à un objet tangible
- ✗ moindre accessibilité



Est-il possible de répondre simultanément à tous ces objectifs ?

- Avec de nouvelles approches radicalement différentes ?
 - En améliorant les approches proposées, pour combler leurs points faibles ?
-

Appareil mobile et objets tangibles

- utilisation d'objets de l'environnement comme objets tangibles

Appareil mobile seul

- optimisation des fonctions de transfert à chaque modèle d'appareil

Volume tangible

- développement des technologies de suivi 3D intégré
- caractérisation de la tolérance à un suivi imparfait