

*Séminaire général de l'École doctorale 1 en philosophie  
12/11/2015, Namur, Belgique*

***Statut ontologique  
des symétries en physique***

Présenté par Valeriya Chasova

Promoteur Alexandre Guay

*Université catholique de Louvain (UCL)  
Centre de philosophie des sciences et sociétés (CEFISES)*

# Introduction

Positionnement de ma recherche:

- Tradition analytique
- Philosophie de la physique
- Ontologie (en philosophie de la physique, vs en métaphysique analytique, en philosophie des sciences)

Question en vue:

- Ontologie des relations (vs objets, propriétés)

Ce que j'étudie:

- Symétries de la dynamique (vs des objets)

Distinction utile:

- Symétries dans l'observation vs dans la théorie

# Problématique générale

- Les théories physiques portent sur le monde physique
- On souhaite déterminer les éléments de la théorie auxquels correspond quelque chose dans le monde: les éléments ontologiquement significatives
- Mais on n'a pas d'accès direct à beaucoup de choses dont traite la physique (on ne voit pas les particules, on n'était pas là à l'origine du monde etc.)
- Aussi, la correspondance entre les éléments de la théorie et du monde n'est pas toujours un-à-un
- Notamment, certains éléments de la théorie semblent ne correspondre à rien tout en étant utiles (exemple: fonction d'onde dans la mécanique quantique)

# Problématique qui m'intéresse

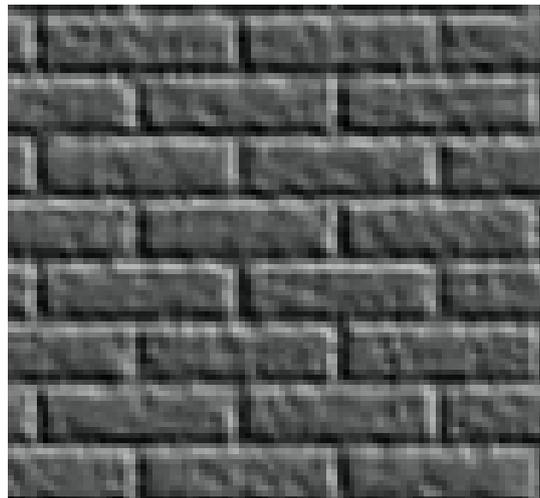
- Plusieurs descriptions théoriques peuvent correspondre à la même situation physique observable
  - Elles peuvent en plus être en grande partie identiques
  - Les différences restantes sont-elles ontologiquement significatives?
- 
- D'après l'argument par invariance seule la partie identique serait ontologiquement significative
  - On a proposé d'étendre ce statut aux différences pour les symétries théoriques ayant un analogue observable
  - J'expliquerai en quoi cet analogue observable consiste et je montrerai que les mêmes symétries théoriques l'ont et ne l'ont pas selon que les conditions supplémentaires que je préciserai s'obtiennent

# Symétries

Symétrie d'un objet:



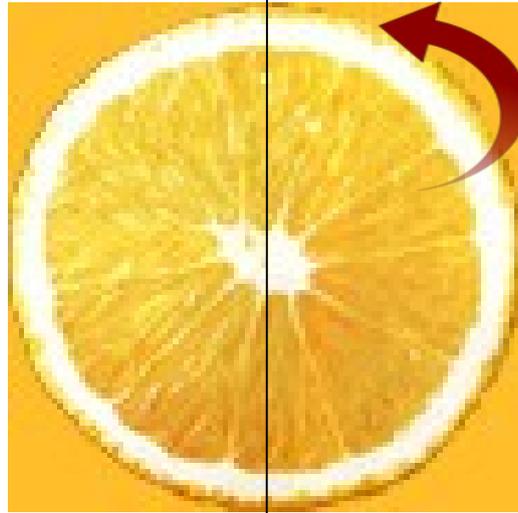
Symétrie d'un motif:



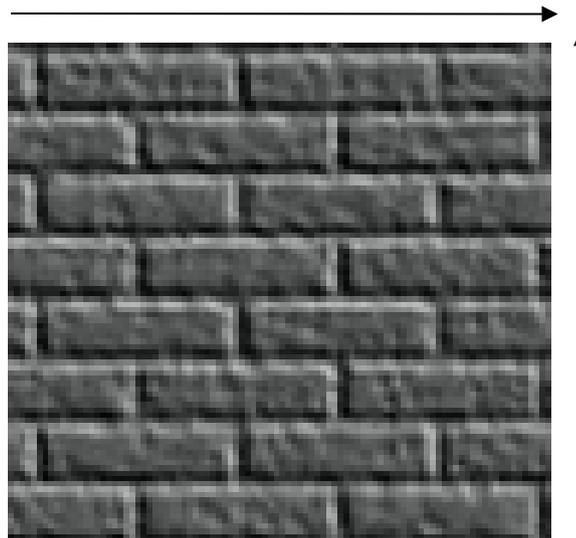
Comment formaliser le concept de symétrie?

# Symétries (formalisation)

Symétrie d'un objet:  
(+approximation)



Symétrie d'un motif:  
(+infini)



Symétrie comme ***invariance sous une transformation***:  
certaine rotation, réflexion, translation...  
On utilise ensuite la notion de groupe en mathématiques

# Symétries théoriques

Lorsque plusieurs descriptions théoriques correspondent à la même situation physique observable, elles peuvent être liées par une **symétrie théorique des descriptions**:

- Une *transformation* peut être disponible qui permettrait de passer d'une description à une autre
- Et on peut avoir une partie *invariante* qui est la partie commune à toutes ces descriptions

Si les lois de la théorie

- restent *invariantes* sous une *transformation* entre les descriptions (qu'elle est ou non leur symétrie)
- ou bien sont *covariantes*, c'est-à-dire changent mais de façon spécifiée par une autre *transformation* en fonction de la transformation entre les descriptions, alors on a une **symétrie théorique des lois** associée

# MN et RR

La mécanique de Newton (MN) et la relativité restreinte (RR) décrivent les interactions mécaniques entre les corps physiques dans l'espace globalement plat

- La MN est valable pour les corps dont la vitesse  $\ll c$
- La RR est aussi valable pour les vitesses proches de  $c$

Les deux ne sont pas valables pour les corps microscopiques lorsqu'ils manifestent les effets quantiques décrits par la mécanique quantique

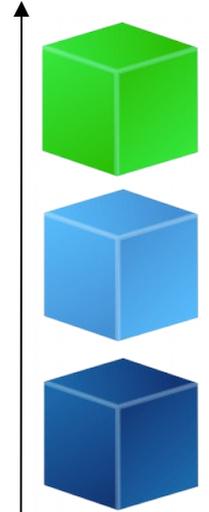
La RR pose la limite à la vitesse  $\Rightarrow$  Les transformations concernant la vitesse diffèrent dans la MN et la RR

La MN postule et la RR ne postule pas l'espace, le temps, le repos absolu  $\Rightarrow$  Les différences des descriptions par rapport à l'espace et au temps physique ont différent statut ontologique dans la MN et la RR

# Espace-temps dans la RR

On considère l'espace et le temps physiques tels qu'ils sont représentés dans la RR

- L'espace-temps de la RR est un ensemble infini de points totalement ordonnés de façon correspondant à une dimension temporelle et aux dimensions spatiales du temps et de l'espace physique
- La métrique définit les distances
- Un **systeme de coordonnées** fournit des coordonnées distinctes à tous les points de l'espace-temps
- Il y a une infinité des systemes de coordonnées
- Exemple: voir l'image

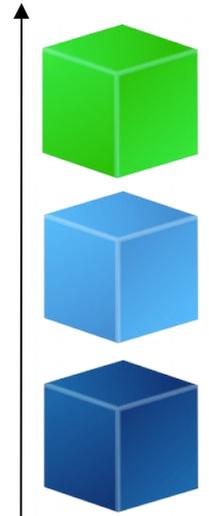


# Dynamique dans la RR

Prenons un système de coordonnées quelconque

- Tous les points ayant la même coordonnée temporelle représentent l'*état* de l'univers à un certain instant

- Tous les points ayant les mêmes coordonnées spatiales représentent l'*évolution* des caractéristiques physiques à un certain endroit



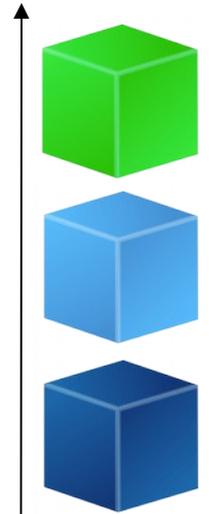
Une restriction de l'ensemble de points à une région de l'espace-temps peut représenter l'évolution des états (=une *dynamique*) d'un **systeme physique**

Exemple de système physique: l'univers (trivialement); champ (dans la représentation occupe une région de l'espace); particule élémentaire (un point de l'espace)

Un système se caractérise par l'autonomie dynamique

# Symétries de la RR

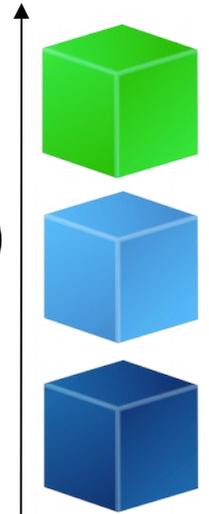
- Les *lois* de la RR sont invariantes sous les transformations de Poincaré (translation spatiale, translation temporelle, rotation spatiale + boost)
- qui sont **externes** (concernent l'espace-temps) ( $\leftrightarrow$  **internes**) et **globales** (affectent tous les points équivalents de la même manière) ( $\leftrightarrow$  **locales**)



- Transformation au sens **passif** = on transforme le système de coordonnées mais pas le système physique
- Transformation au sens **actif** = on transforme le système physique mais pas le système de coordonnées
- **À l'échelle de l'univers**, une transformation passive agit sur l'ensemble de l'espace-temps et une transformation active sur l'ensemble de l'espace ou du temps physiques

# Translations et rotation à l'échelle de l'univers

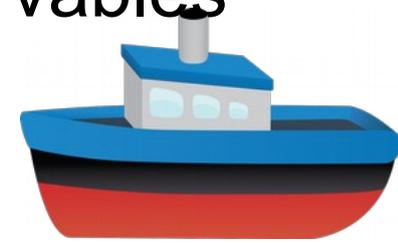
- Translation spatiale ou temporelle: on déplace l'origine d'un axe spatial ou de l'axe temporel (passif) ou bien l'espace entier selon cet axe (actif)
- Rotation spatiale: on tourne les axes spatiales autour de l'origine (passif) ou bien l'espace entier autour d'un point (actif)
- La description des phénomènes reste *invariante*



Les *descriptions* qui diffèrent par une transformation spatiotemporelle active à l'échelle de l'univers (l'analogue du boost compris) seraient ontologiquement différentes pour Newton (mais cf. Leibniz) dans la MN mais sont équivalentes dans la RR donc ne sont que les symétries des descriptions de la RR, contrairement au cas passif

# Boost théorique et le bateau de Galilée

- Boost: acquisition / perte d'un déplacement rectiligne uniforme dans le temps  $\neq$  translation spatiale hors temps
- Systèmes dits ***inertiels*** dont l'un se déplace de façon rectiligne uniforme par rapport à l'autre sont équivalents
- Pourquoi cette **symétrie théorique**?
  
- Galilée (MN): les expériences mécaniques à l'intérieur d'un bateau ne permettent pas de dire s'il est en repos ou en mouvement rectiligne uniforme  $\leftrightarrow$  électromagnétiques
- Einstein (RR): aucune expérience ne le permet
- Mais les bateaux peuvent être différenciés de l'extérieur
- = **Symétrie empirique**: *invariance* dynamique interne + (*transformation et*) *différence relationnelle* observables
- Quand est-ce qu'on a cette **correspondance** des symétries théoriques et empiriques?



# Comment observer la différence?

Pour savoir qu'on a passé d'un bateau original à un bateau transformé on les compare au *même objet de référence* qui détermine un système de coordonnées

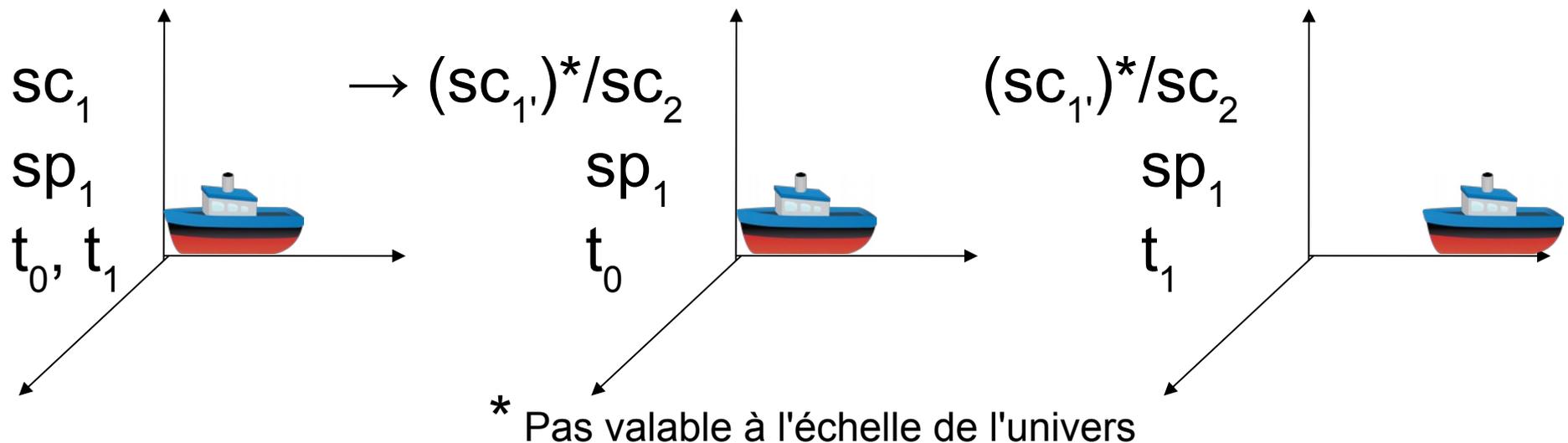
- On peut prendre deux bateaux et un 3e objet tels qu'un bateau se déplace par rapport à cet objet et l'autre pas
- Ou bien un seul bateau qui ne se déplace pas par rapport à l'objet de référence pendant un certain temps, puis se déplace de façon rectiligne uniforme
- L'objet de référence doit être lui aussi inertiel
- Mais la différence est observable parce qu'il *n'était pas transformé* lorsqu'on a passé au bateau transformé
- => Résultat d'une transformation ne peut être observable que si elle est **restreinte** = hors l'objet de référence
- => Elle a lieu dans le même système de coordonnées

# Boost au sens passif

Boost passif: le système de coordonnées transformé se déplace, dans le temps, de façon rectiligne uniforme

Exemple: le bateau fixe, le système de coordonnées originale ne se déplace pas, transformé se déplace à gauche avec une vitesse constante  $-v$

Inobservable; sauf si les SC associés aux objets de référence => grâce au sens restreint (=hors bateau) actif (sur les SC) => le bateau serait l'objet de référence

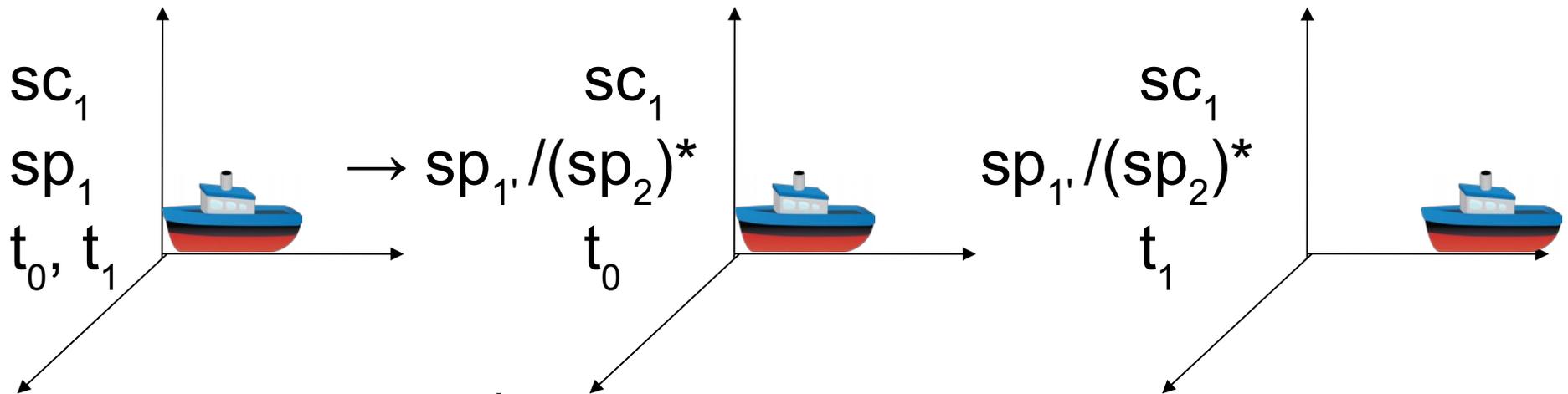


# Boost au sens actif

Boost actif: le système physique transformé se déplace, dans le temps, de façon rectiligne uniforme

Exemple: le bateau original fixe, le bateau transformé se déplace à droite avec une vitesse constante  $v$ , le SC fixe Observable si restreint et le SC associé à un objet de référence

Notez les relations identiques bateau(x) / système(s) de coordonnées aux images de cet exemple et le précédent



\* Pas valable à l'échelle de l'univers

# Comment savoir si le bateau est en repos?

- Le bateau ne se déplace pas par rapport à l'objet de référence => il est en repos, sinon en mouvement (ex.2)
  - Mais le choix de l'objet de référence est arbitraire
  - On pourrait prendre un autre objet de référence qui se déplace par rapport au 1er objet de référence (ex.1)
  - Dans le système de coordonnées déterminé par le 2nd objet de référence le bateau qu'on comptait comme étant en mouvement peut être en repos et vice versa
  - Même dynamique interne pour toute vitesse constante
- => On ne peut pas déterminer quelle est la vitesse *absolue* d'un objet mais uniquement quelle est sa vitesse *relativement à un autre objet*

# Équivalence des descriptions

- À l'intérieur de chaque système de coordonnées les vitesses absolues sont assignées ( $V$ ); les vitesses relatives correspondent aux différences de vitesses ( $\Delta V$ )
- Seules les vitesses relatives sont observables => Les descriptions sur base des différents SC qui s'accordent sur les  $\Delta V$  sont équivalentes quant aux observations

- Exemple des descriptions équivalentes:

$$(I) \quad V(sp_1) = \mathbf{0} \quad V(sp_2) = v \quad \Delta V = v \quad (V_{II} = V_I - v)$$

$$(II) \quad V(sp_1) = -v \quad V(sp_2) = \mathbf{0} \quad \Delta V = v \quad (V_{III} = V_{II} - v/3)$$

$$(III) \quad V(sp_1) = -4v/3 \quad V(sp_2) = -v/3 \quad \Delta V = v \quad \text{etc.}$$

*= Les descriptions liées par une transformation à l'échelle de l'univers sont départagées en classes qui diffèrent par une transformation restreinte*

# Correspondance pour le boost

Boost à l'échelle de l'univers actif / passif: ajouter une même  $v$  à chaque point de l'univers physique / de la RR

- Dynamique interne préservée, les  $\Delta V$  préservées
- Inobservable donc aucune symétrie empirique ne peut y correspondre

Boost restreint actif: ajouter une même  $v$  à chaque point d'un système physique mais pas ailleurs

- On garde le même système de coordonnées
- Dynamique interne préservée (*invariance*), les  $\Delta V$  changent (*transformation*)
- Observable et correspond à une symétrie empirique

Boost restreint passif: systèmes de coordonnées locaux

- Inobservable

# Translations et rotation restreintes

Translation spatiale, temporelle, rotation spatiale actives restreintes correspondent aux symétries empiriques

- Les mêmes expériences faites dans les places et temps différents sur la Terre (qui est localement un SP inertiel) ont les mêmes résultats (du moins statistiquement, notamment en mécanique quantique)

Ces symétries empiriques peuvent se combiner avec d'autres. En particulier:

- La comparaison entre les deux bateaux présuppose une symétrie sous translation spatiale
- La comparaison entre un bateau original et transformé présuppose une symétrie sous translation temporelle
- L'analogie du boost fait appel aux deux symétries mais de façon étalée dans l'espace et le temps physiques

# Résumé

- Symétrie: invariance sous une transformation
- Symétrie théorique concerne les descriptions / les lois
- Différence relationnelle observable entre les systèmes physiques + invariance dynamique observable restreinte à chaque système physique => symétrie empirique
  
- Les lois de la RR sont invariantes sous les transformations de Poincaré à l'échelle de l'univers et restreintes actives et passives
- À toutes les transformations de Poincaré actives restreintes correspondent des symétries empiriques
- Les différences des descriptions liées par une symétrie théorique interprétée passivement ne sont pas ontologiquement significatives même pour les symétries ayant un analogue empirique dans un autre contexte

# Quelques questions

Quand est-ce qu'on a une correspondance entre une symétrie théorique active restreinte et une symétrie empirique?

- On adapte les symétries théoriques aux empiriques?
- Lorsque les transformations sont externes? globales?

Quelle ontologie sur cette base?

- Dans les symétries empiriques les relations ( $\Delta V$ ) sont plus importantes que les propriétés ( $V$ )?
- Newton sur l'espace et le temps absolu indétectables
- Représentations globales et locales suggèrent des ontologies différentes

Définitions de symétrie empirique, de système physique etc.

# Dans la thèse

Différentes théories:

- relativité restreinte, relativité générale,
  - électrostatique, électrodynamique classique,
  - mécanique quantique, MQ + CED,
  - théories de jauge
- & Différentes symétries empiriques correspondantes

Hypothèses:

- pareil pour les symétries internes et externes
- pour une symétrie empirique donnée on peut toujours construire des représentations globale et locale
- interprétation active induit une interprétation passive mais pas à l'inverse

Dans la suite: théorèmes de conservation...

Merici