

Quelques Aspects de la Théorie des Cordes

Domenico Orlando
CPHT École polytechnique - Palaiseau

December 1, 2003

Itinéraire

Itinéraire

✘ Relativité générale.

Itinéraire

✘ Relativité générale.

✘ Cordes.

Itinéraire

- ✘ Relativité générale.
- ✘ Cordes.
- ✘ Basse énergie.

Itinéraire

- ✘ Relativité générale.
- ✘ Cordes.
- ✘ Basse énergie.
- ✘ D-branes.

Itinéraire

- ✘ Relativité générale.
- ✘ Cordes.
- ✘ Basse énergie.
- ✘ D-branes.
- ✘ Dimensions supplémentaires.

Itinéraire

- ✘ Relativité générale.
- ✘ Cordes.
- ✘ Basse énergie.
- ✘ D-branes.
- ✘ Dimensions supplémentaires.
- ✘ Théorie M.

Relativité Générale

Relativité Générale

- ✘ Idée centrale de la relativité générale: la métrique de l'espace-temps n'est pas figée mais agit sur les autres constituants de la théorie, et subit leur influence.

Courbure = Matière

Relativité Générale

- ✘ Idée centrale de la relativité générale: la métrique de l'espace-temps n'est pas figée mais agit sur les autres constituants de la théorie, et subit leur influence.

$$\text{Courbure} = \text{Matière}$$

- ✘ Problèmes:

Relativité Générale

- ✘ Idée centrale de la relativité générale: la métrique de l'espace-temps n'est pas figée mais agit sur les autres constituants de la théorie, et subit leur influence.

$$\text{Courbure} = \text{Matière}$$

- ✘ Problèmes:
 - ✘ L'équation est *god-given*. Elle ne découle pas d'autres principes physiques plus fondamentaux;

Relativité Générale

- ✗ Idée centrale de la relativité générale: la métrique de l'espace-temps n'est pas figée mais agit sur les autres constituants de la théorie, et subit leur influence.

$$\text{Courbure} = \text{Matière}$$

- ✗ Problèmes:
 - ✗ L'équation est *god-given*. Elle ne découle pas d'autres principes physiques plus fondamentaux;
 - ✗ On ne peut pas construire une **théorie des champs** pour la relativité;

Particule **P**onctuelle

Particule Ponctuelle

- ✘ Considérons une particule ponctuelle dans un espace-temps courbe

Particule Ponctuelle

- ✘ Considérons une particule ponctuelle dans un espace-temps courbe
- ✘ Pour étudier son mouvement, nous pouvons faire l'approximation de la **particule-test**, c'est-à-dire supposer que la masse est si petite qu'elle n'agit pas sur la métrique.

Particule Ponctuelle

- ✘ Considérons une particule ponctuelle dans un espace-temps courbe
- ✘ Pour étudier son mouvement, nous pouvons faire l'approximation de la **particule-test**, c'est-à-dire supposer que la masse est si petite qu'elle n'agit pas sur la métrique.
- ✘ L'espace-temps passe au second plan. Nous **n'étudions plus la relativité** générale mais une autre théorie.

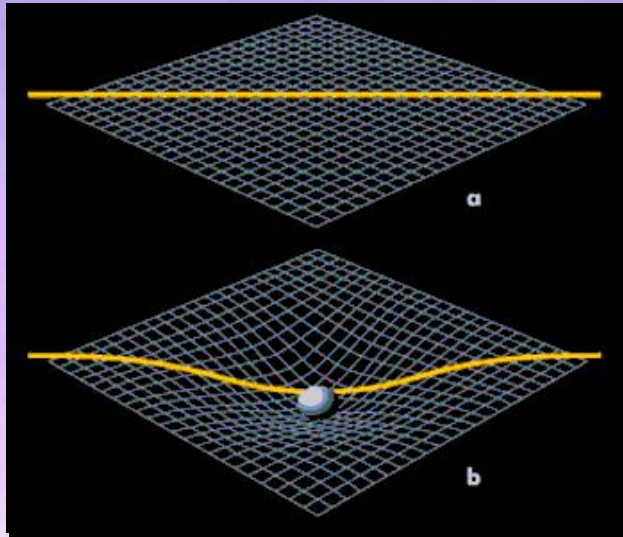
Particule Ponctuelle

- ✘ Considérons une particule ponctuelle dans un espace-temps courbe
- ✘ Pour étudier son mouvement, nous pouvons faire l'approximation de la **particule-test**, c'est-à-dire supposer que la masse est si petite qu'elle n'agit pas sur la métrique.
- ✘ L'espace-temps passe au second plan. Nous **n'étudions plus la relativité** générale mais une autre théorie.
- ✘ Au cours de son mouvement dans l'espace-temps, la particule décrit une ligne (ligne d'univers).

Particule **P**onctuelle

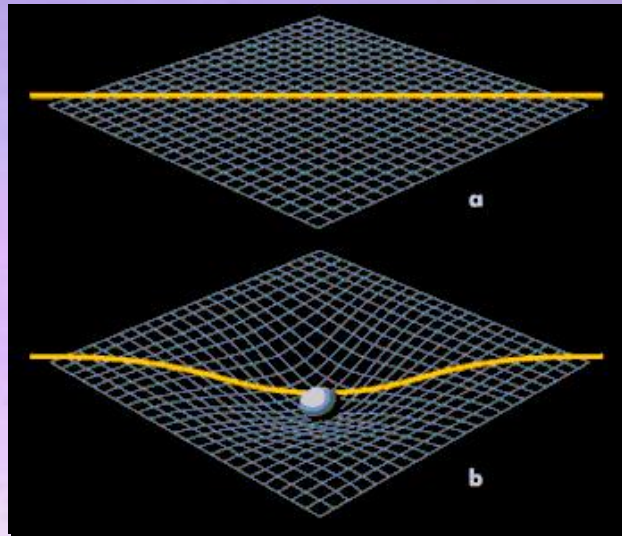
Particule Ponctuelle

- ✘ En l'absence de forces cette ligne est le chemin le plus court entre le point initial et le point final (une **géodésique**): il s'agit du chemin le plus "droit" possible dans une métrique donnée.



Particule Ponctuelle

- ✘ En l'absence de forces cette ligne est le chemin le plus court entre le point initial et le point final (une **géodésique**): il s'agit du chemin le plus "droit" possible dans une métrique donnée.



- ✘ Message profond: **la gravité n'est pas une force** mais une déformation de l'espace-temps où la particule évolue suivant le chemin le plus court.

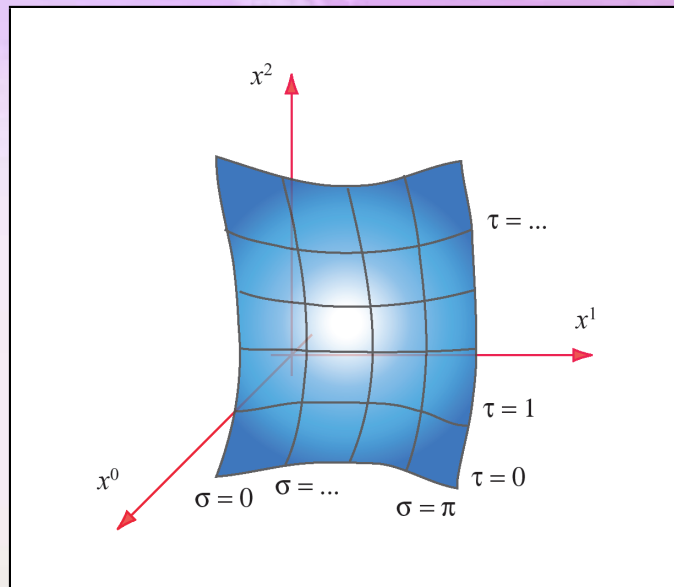
Les Cordes

Les Cordes

- ✘ Au lieu d'une particule, considérons un objet de **dimension un**: une corde.

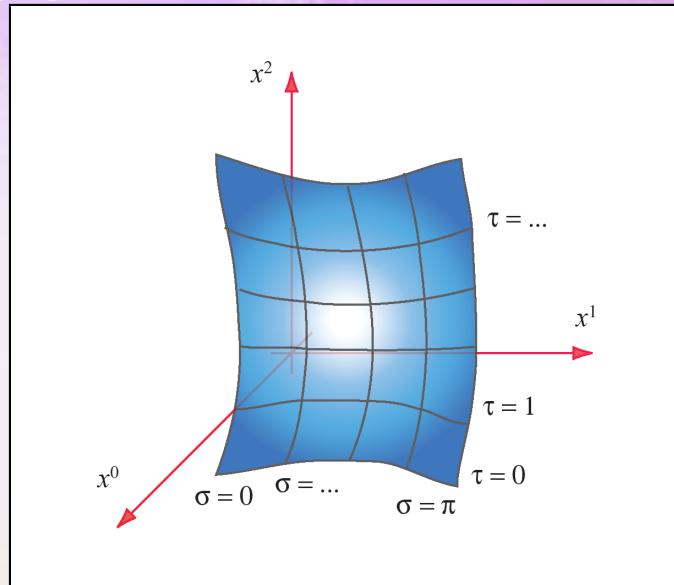
Les Cordes

- ✘ Au lieu d'une particule, considérons un objet de **dimension un**: une corde.
- ✘ De même que la particule décrivait une ligne au cours de son mouvement, la corde décrit une surface: la feuille d'univers.



Les Cordes

- ✘ Au lieu d'une particule, considérons un objet de **dimension un**: une corde.
- ✘ De même que la particule décrivait une ligne au cours de son mouvement, la corde décrit une surface: la feuille d'univers.
- ✘ Pour la particule ponctuelle nous avons cherché les trajectoires les plus courtes; à présent nous demandons que l'aire de la surface d'univers soit minimale.



Miracle !

Miracle !

- ✘ Physique à **basse énergie** (distances grandes devant l'échelle de Planck $E_p \simeq 10^{19}\text{GeV}$).

Miracle !

- ✘ Physique à **basse énergie** (distances grandes devant l'échelle de Planck $E_p \simeq 10^{19}\text{GeV}$).
- ✘ Avec une théorie ne contenant que des bosons, on trouve la **relativité générale** en dimension 26.

Miracle !

- ✘ Physique à **basse énergie** (distances grandes devant l'échelle de Planck $E_p \simeq 10^{19}\text{GeV}$).
- ✘ Avec une théorie ne contenant que des bosons, on trouve la **relativité générale** en dimension 26.
- ✘ Ajoutons des fermions: on trouve une théorie de **supergravité** en dimension 10.

Miracle !

- ✗ Physique à **basse énergie** (distances grandes devant l'échelle de Planck $E_p \simeq 10^{19}\text{GeV}$).
- ✗ Avec une théorie ne contenant que des bosons, on trouve la **relativité générale** en dimension 26.
- ✗ Ajoutons des fermions: on trouve une théorie de **supergravité** en dimension 10.
- ✗ **Une seule constante** de couplage.

Miracle !

- ✗ Physique à **basse énergie** (distances grandes devant l'échelle de Planck $E_p \simeq 10^{19}\text{GeV}$).
- ✗ Avec une théorie ne contenant que des bosons, on trouve la **relativité générale** en dimension 26.
- ✗ Ajoutons des fermions: on trouve une théorie de **supergravité** en dimension 10.
- ✗ **Une seule constante** de couplage.
- ✗ La constante de Newton devient une variable dynamique: apparition naturelle de **l'inflation**.

Cordes Ouvertes, Cordes Fermées

Cordes Ouvertes, Cordes Fermées

- ✘ Il existe deux types de cordes, selon que les extrémités sont séparées ou recollées:

Cordes Ouvertes, Cordes Fermées

- ✘ Il existe deux types de cordes, selon que les extrémités sont séparées ou recollées:
- ✘ les **cordes fermées** engendrent le graviton (la particule qui transporte la gravité), le dilaton (qui mesure la force des interactions), et un champ de fond antisymétrique;



Cordes Ouvertes, Cordes Fermées

- ✗ Il existe deux types de cordes, selon que les extrémités sont séparées ou recollées:
- ✗ les **cordes fermées** engendrent le graviton (la particule qui transporte la gravité), le dilaton (qui mesure la force des interactions), et un champ de fond antisymétrique;



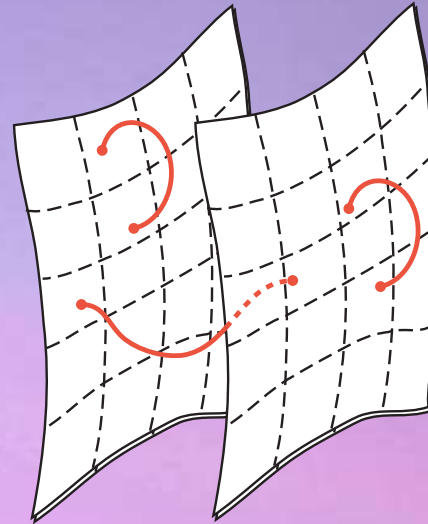
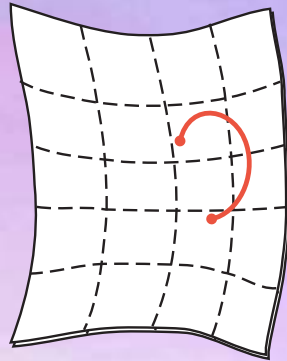
- ✗ les **cordes ouvertes** engendrent les bosons de jauge.



Cordes Ouvertes et D-branes

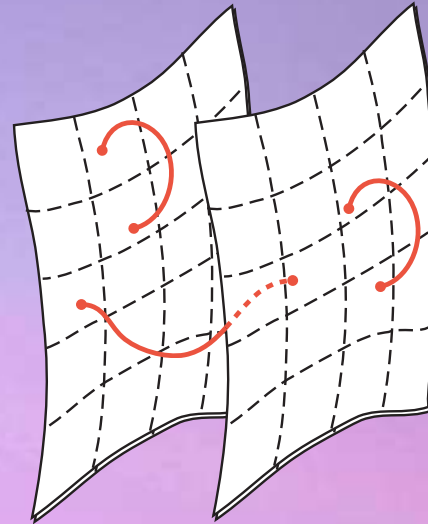
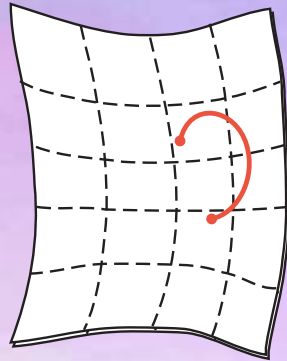
Cordes Ouvertes et D-branes

- ✘ Les extrémités des cordes ouvertes ne sont pas libres de faire ce qu'elles veulent mais sont attachées à certaines surfaces: les **D-branes**.



Cordes Ouvertes et D-branes

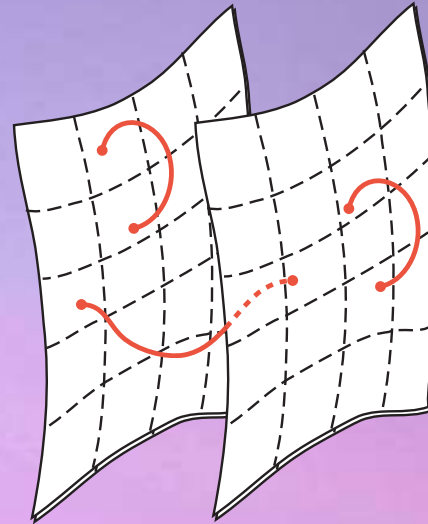
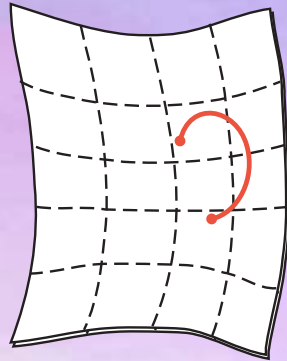
- ✘ Les extrémités des cordes ouvertes ne sont pas libres de faire ce qu'elles veulent mais sont attachées à certaines surfaces: les **D-branes**.



- ✘ Ces D-branes sont des objets à p dimensions qui se déplacent dans l'espace-temps à dix dimensions.

Cordes Ouvertes et D-branes

- ✘ Les extrémités des cordes ouvertes ne sont pas libres de faire ce qu'elles veulent mais sont attachées à certaines surfaces: les **D-branes**.



- ✘ Ces D-branes sont des objets à p dimensions qui se déplacent dans l'espace-temps à dix dimensions.
- ✘ Il s'agit d'**objets dynamiques** — exactement comme les cordes — qui évoluent au cours du temps.

Trop de Dimensions ?

Trop de Dimensions ?

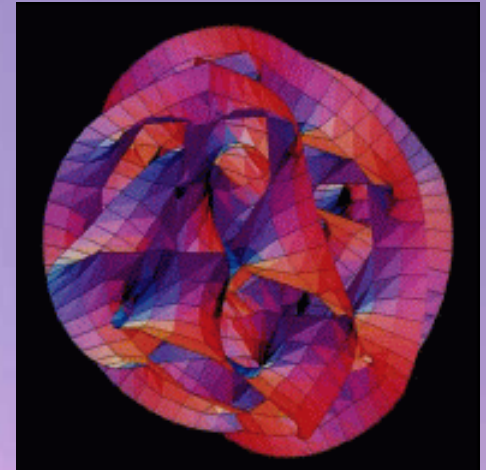
- ✘ Mais s'il y a dix dimensions, pourquoi n'en voyons-nous que quatre ?

Trop de Dimensions ?

- ✘ Mais s'il y a dix dimensions, pourquoi n'en voyons-nous que quatre ?
- ✘ Réponse n.1:

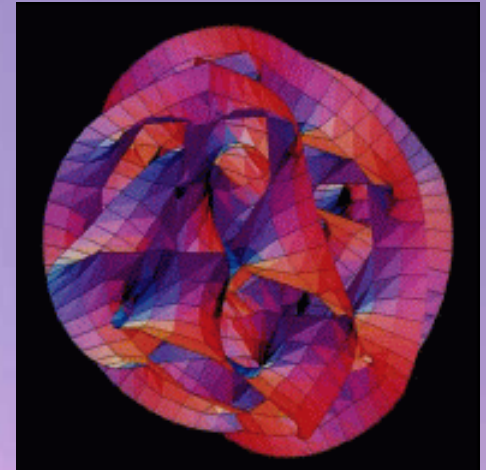
Trop de Dimensions ?

- ✗ Mais s'il y a dix dimensions, pourquoi n'en voyons-nous que quatre ?
- ✗ Réponse n.1:
 - ✗ Les six autres sont **compactifiées**, c'est-à-dire qu'elles ne s'étendent pas à l'infini mais sur une échelle (très ?) petite (Kaluza–Klein $\sim 10^{-35}$ m).



Trop de Dimensions ?

- ✗ Mais s'il y a dix dimensions, pourquoi n'en voyons-nous que quatre ?
- ✗ Réponse n.1:
 - ✗ Les six autres sont **compactifiées**, c'est-à-dire qu'elles ne s'étendent pas à l'infini mais sur une échelle (très ?) petite (Kaluza–Klein $\sim 10^{-35}$ m).
- ✗ Réponse n.2:

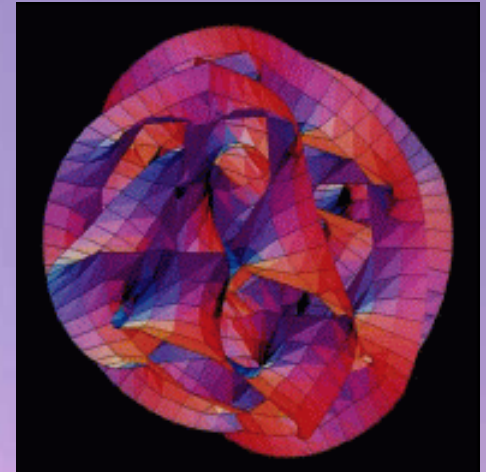


Trop de Dimensions ?

✗ Mais s'il y a dix dimensions, pourquoi n'en voyons-nous que quatre ?

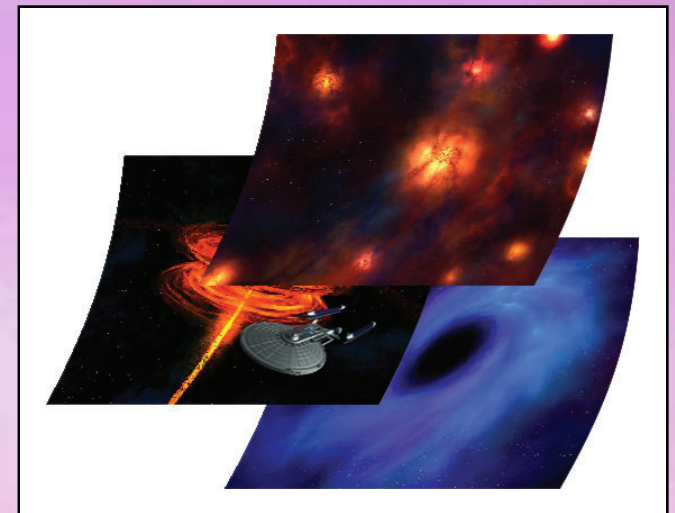
✗ Réponse n.1:

✗ Les six autres sont **compactifiées**, c'est-à-dire qu'elles ne s'étendent pas à l'infini mais sur une échelle (très ?) petite (Kaluza–Klein ~ 1920).



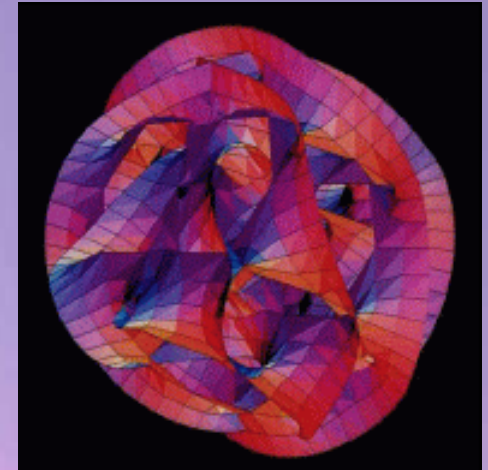
✗ Réponse n.2:

✗ En réalité nous vivons sur une **membrane** à trois dimensions.



Trop de Dimensions ?

- ✗ Mais s'il y a dix dimensions, pourquoi n'en voyons-nous que quatre ?
- ✗ Réponse n.1:
 - ✗ Les six autres sont **compactifiées**, c'est-à-dire qu'elles ne s'étendent pas à l'infini mais sur une échelle (très ?) petite (Kaluza–Klein ~ 1920).
- ✗ Réponse n.2:
 - ✗ En réalité nous vivons sur une **membrane** à trois dimensions.
 - ✗ Expérimentalement ? Corrections à courtes distances de la gravité.



Théorie M

The Theory Formerly Known as Strings

Théorie M

The Theory Formerly Known as Strings

- ✘ Jusqu'ici nous avons parlé de la théorie des cordes, mais il en existe **cinq versions**.

Théorie M

The Theory Formerly Known as Strings

- ✘ Jusqu'ici nous avons parlé de la théorie des cordes, mais il en existe **cinq versions**.
- ✘ Ces différentes théories sont liées entre elles par un réseau de transformations de **dualités**.

Théorie M

The Theory Formerly Known as Strings

- ✘ Jusqu'ici nous avons parlé de la théorie des cordes, mais il en existe **cinq versions**.
- ✘ Ces différentes théories sont liées entre elles par un réseau de transformations de **dualités**.
- ✘ En réalité ces cinq théories ne sont autres que des réductions de la même théorie de dimension onze: la théorie M, où les cordes ont disparu; il reste le M comme **Mystère...**

