



# Quelle Energie pour demain ?

---

Antoine Moreau

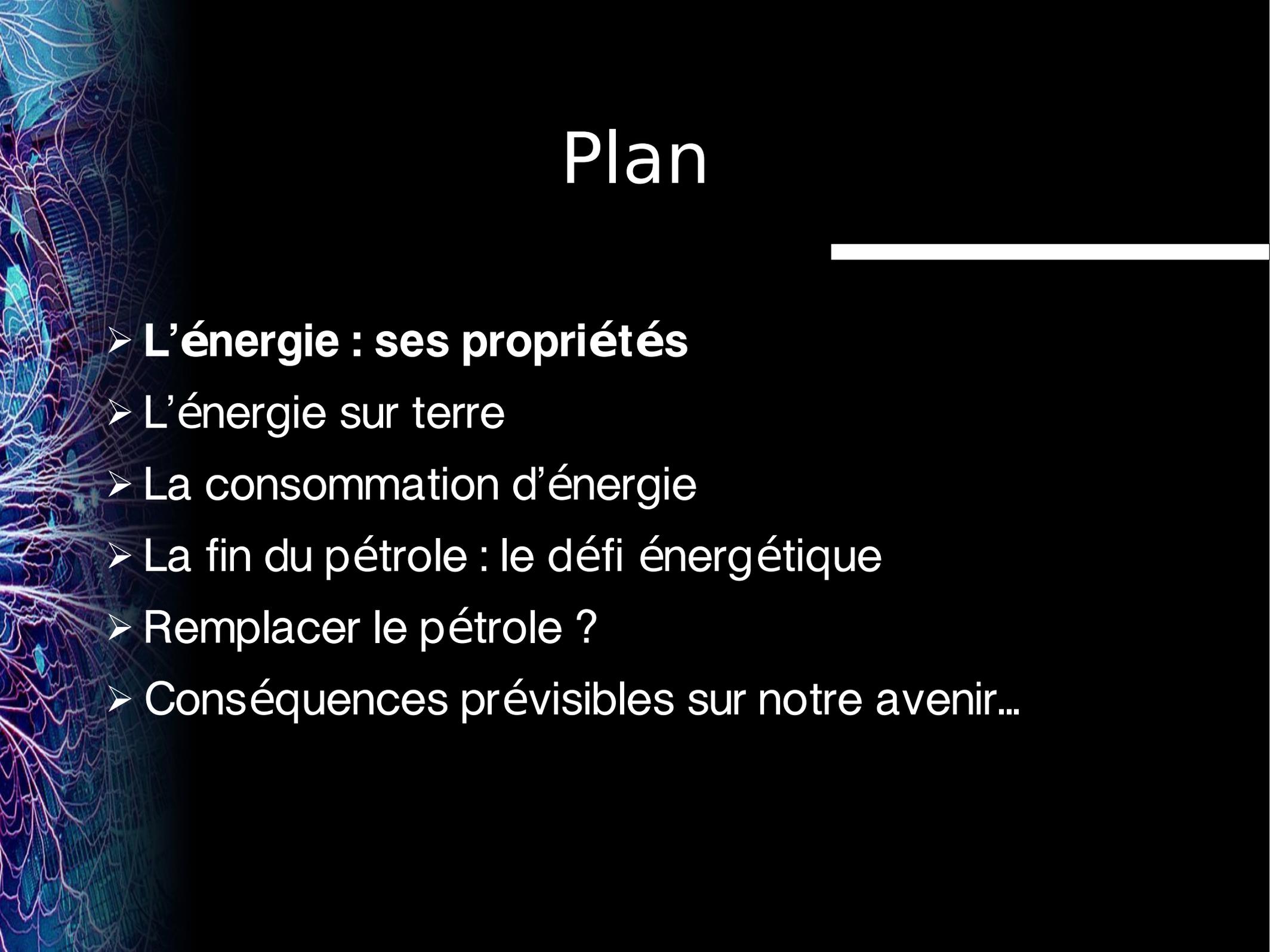
*Maître de Conférences*

*Université Blaise Pascal*

*[antoine.moreau@univ-bpclermont.fr](mailto:antoine.moreau@univ-bpclermont.fr)*

<http://www.e-scio.net>

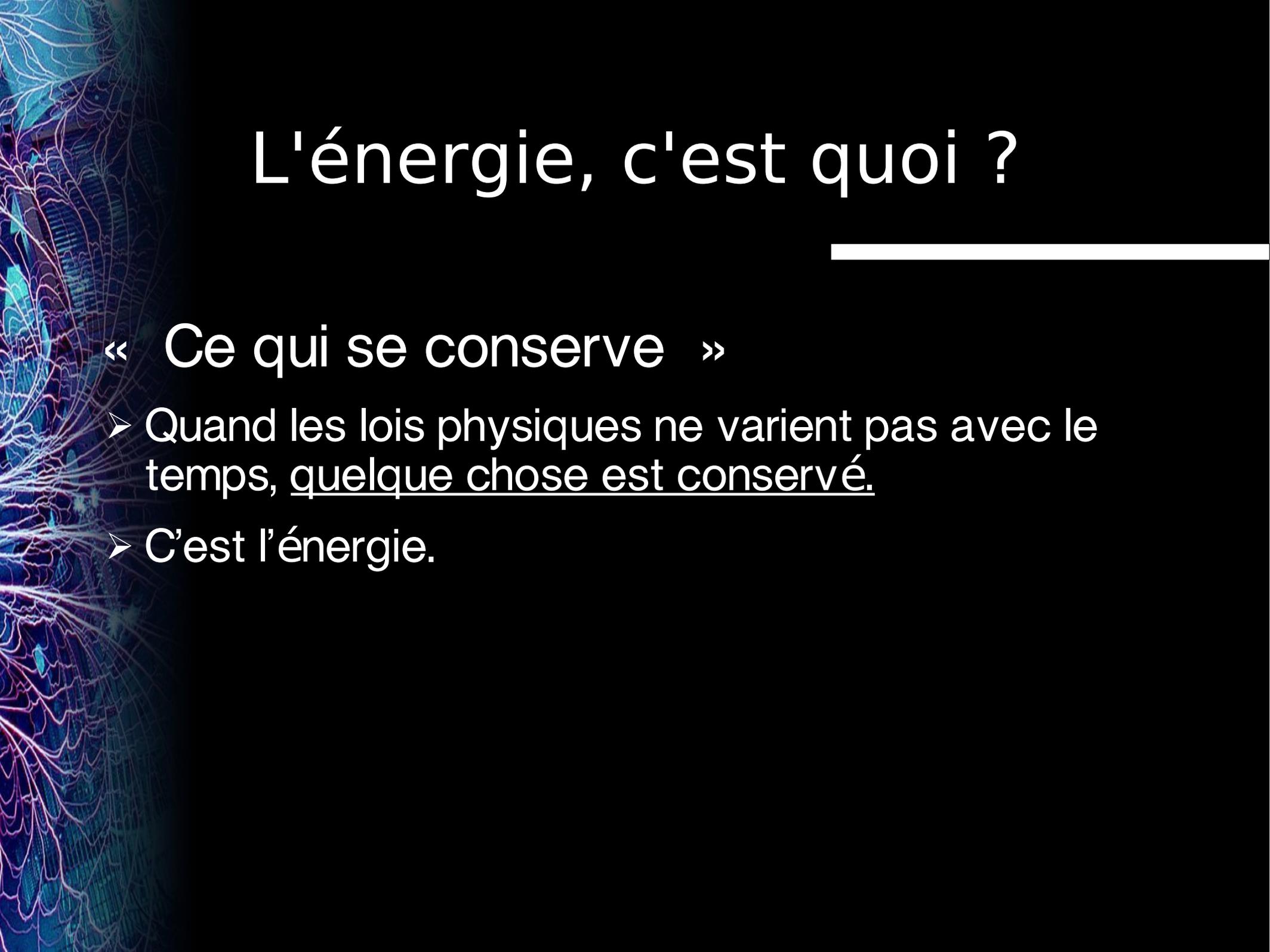
<http://elma.univ-bpclermont.fr/moreau>



# Plan

---

- **L'énergie : ses propriétés**
- L'énergie sur terre
- La consommation d'énergie
- La fin du pétrole : le défi énergétique
- Remplacer le pétrole ?
- Conséquences prévisibles sur notre avenir...



# L'énergie, c'est quoi ?

---

« Ce qui se conserve »

- Quand les lois physiques ne varient pas avec le temps, quelque chose est conservé.
- C'est l'énergie.



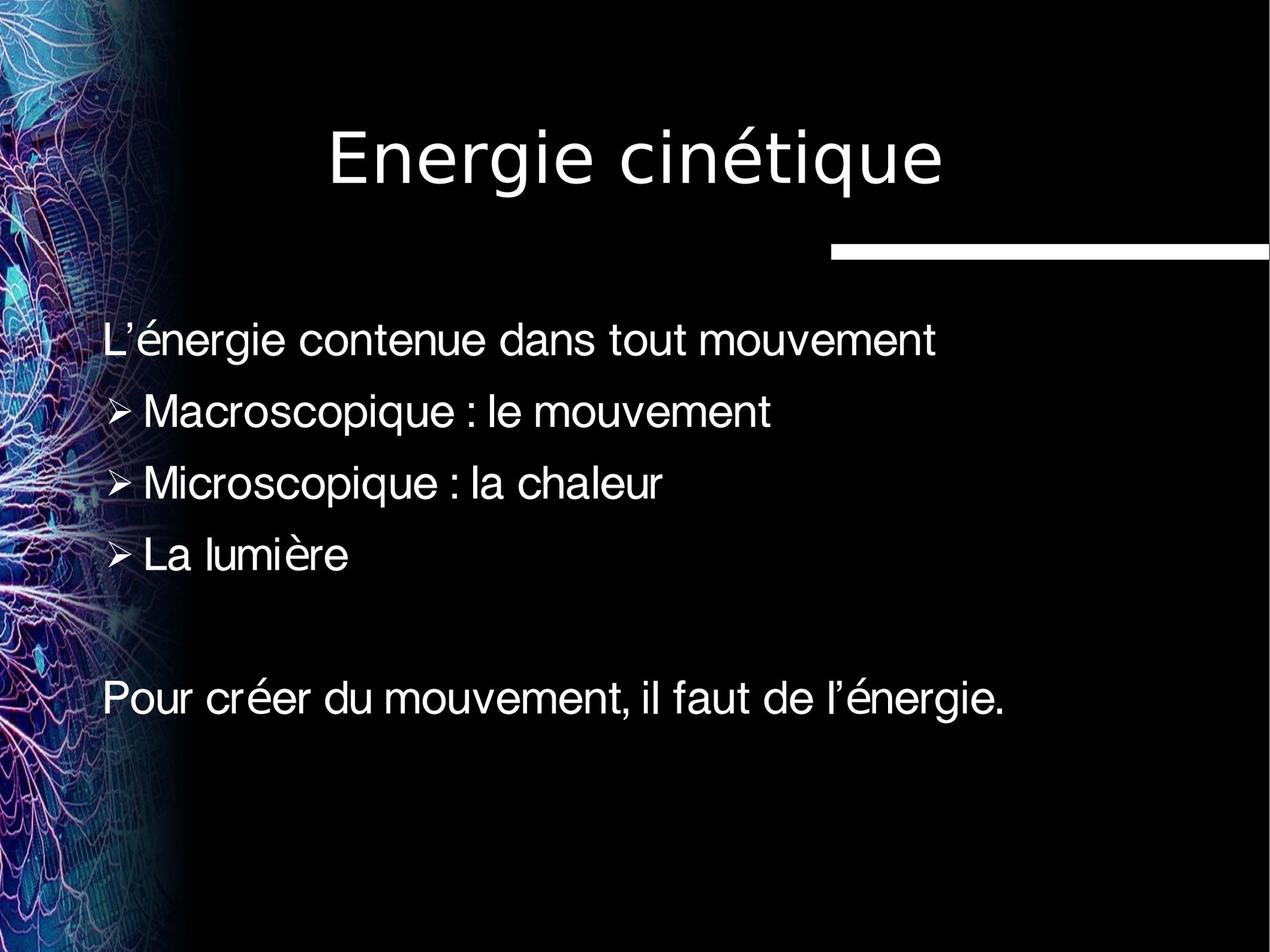
# Les formes de l'énergie

---

L'énergie se conserve : elle change de forme, mais la quantité totale ne change pas.

Il y a deux grandes classes de formes :

- L'énergie cinétique (le mouvement) : visible, sensible.
- L'énergie potentielle : invisible.



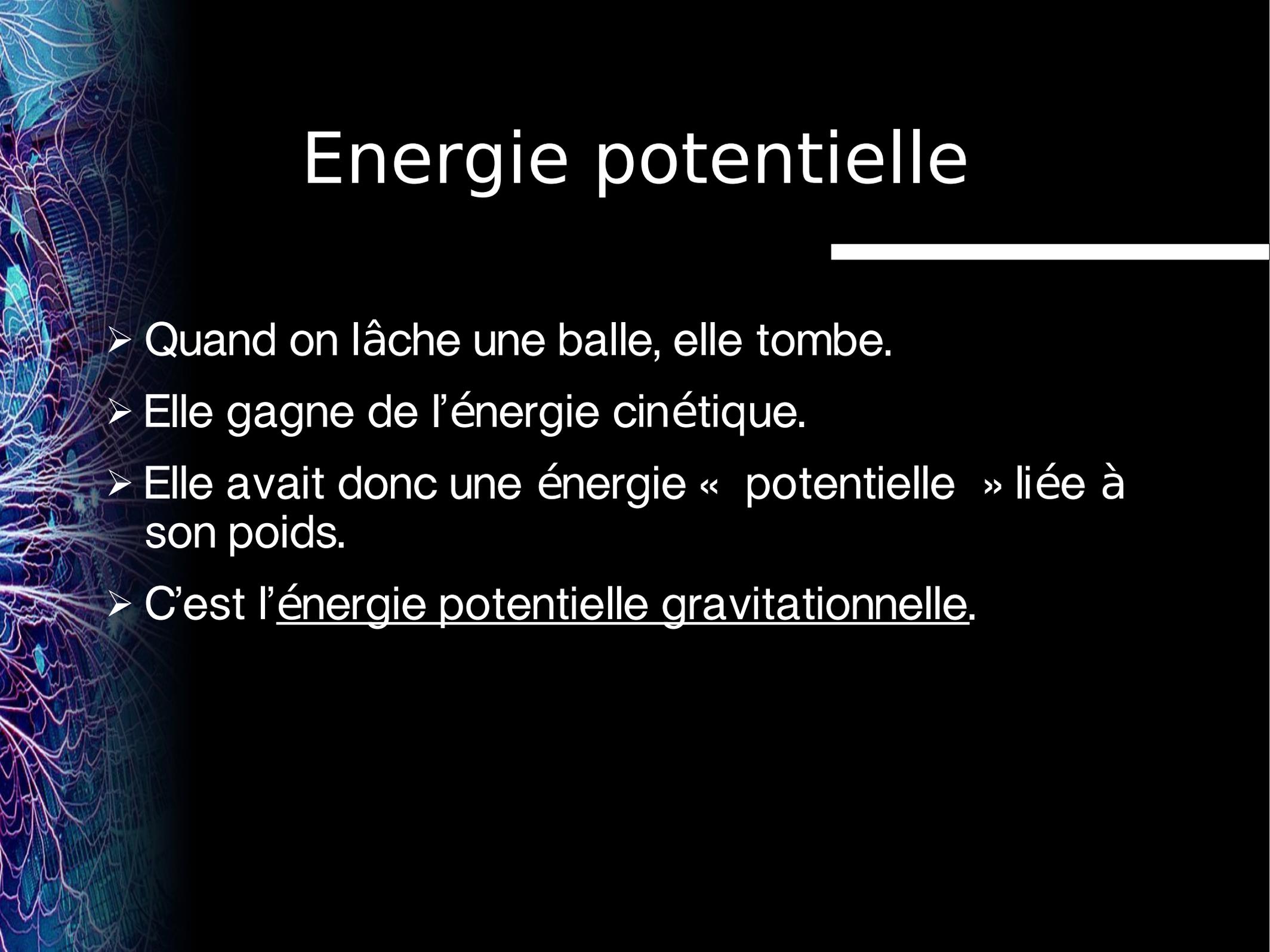
# Energie cinétique

---

L'énergie contenue dans tout mouvement

- Macroscopique : le mouvement
- Microscopique : la chaleur
- La lumière

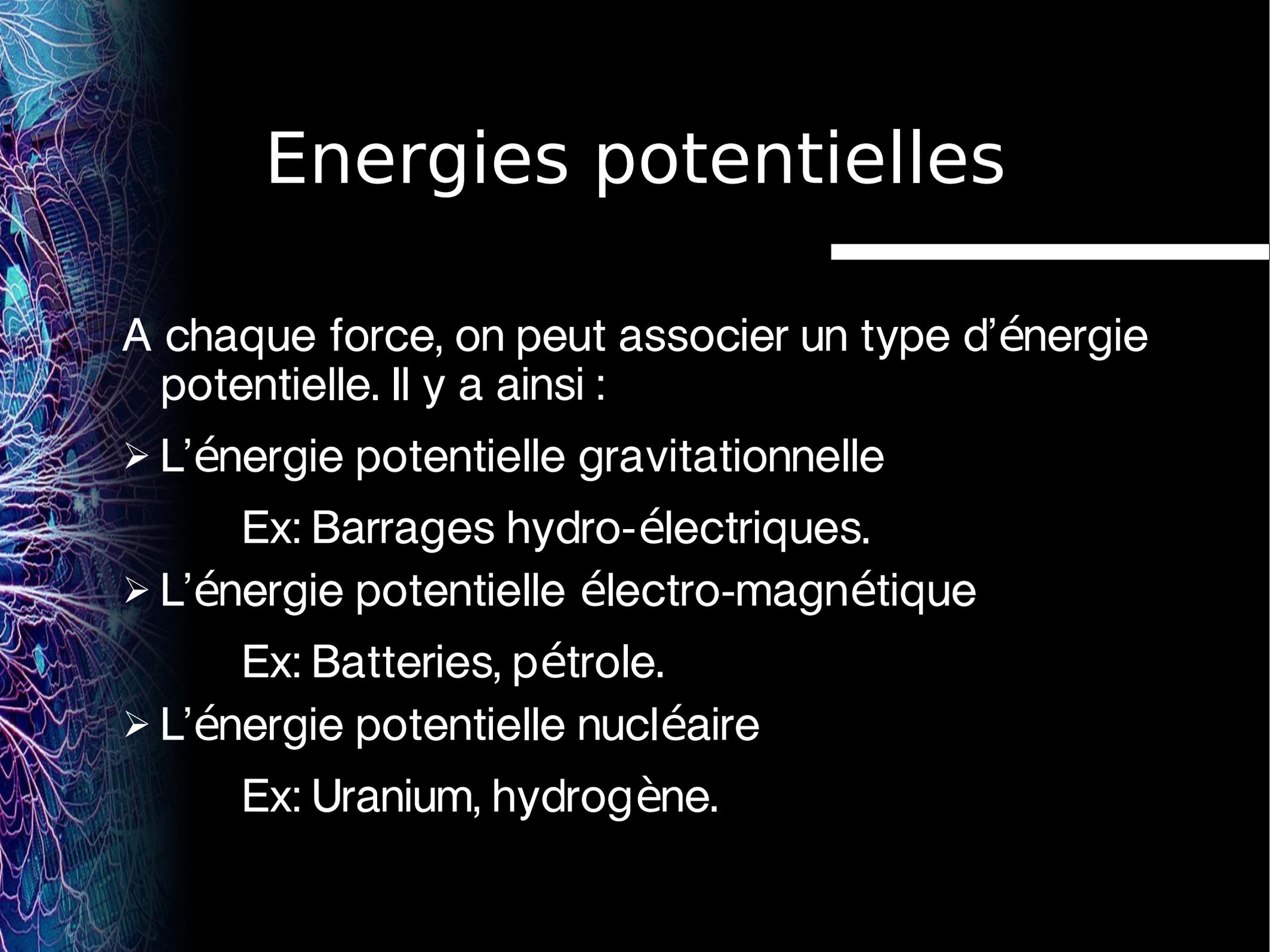
Pour créer du mouvement, il faut de l'énergie.



# Energie potentielle

---

- Quand on lâche une balle, elle tombe.
- Elle gagne de l'énergie cinétique.
- Elle avait donc une énergie « potentielle » liée à son poids.
- C'est l'énergie potentielle gravitationnelle.

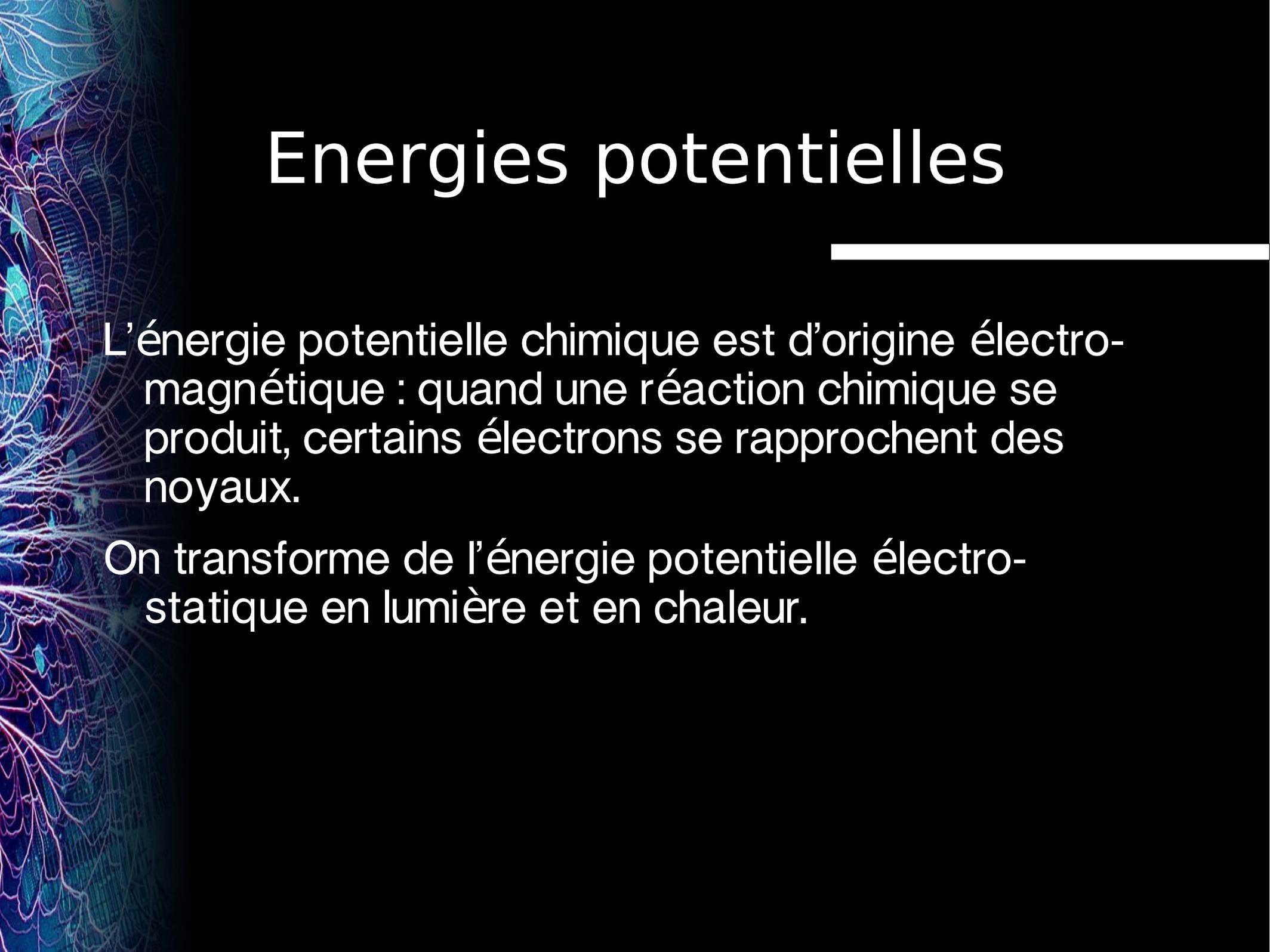


# Energies potentielles

---

A chaque force, on peut associer un type d'énergie potentielle. Il y a ainsi :

- L'énergie potentielle gravitationnelle  
Ex: Barrages hydro-électriques.
- L'énergie potentielle électro-magnétique  
Ex: Batteries, pétrole.
- L'énergie potentielle nucléaire  
Ex: Uranium, hydrogène.

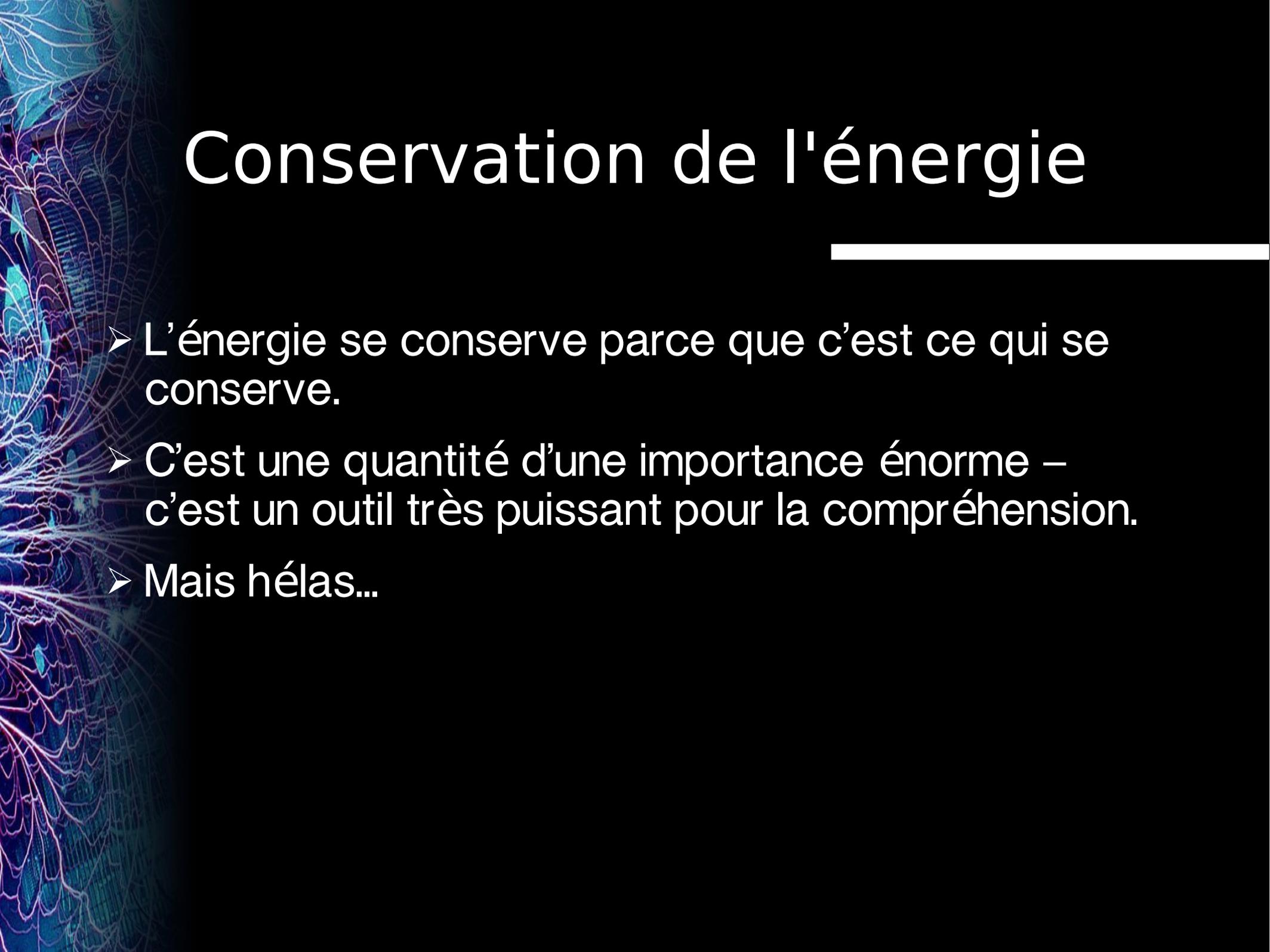


# Energies potentielles

---

L'énergie potentielle chimique est d'origine électromagnétique : quand une réaction chimique se produit, certains électrons se rapprochent des noyaux.

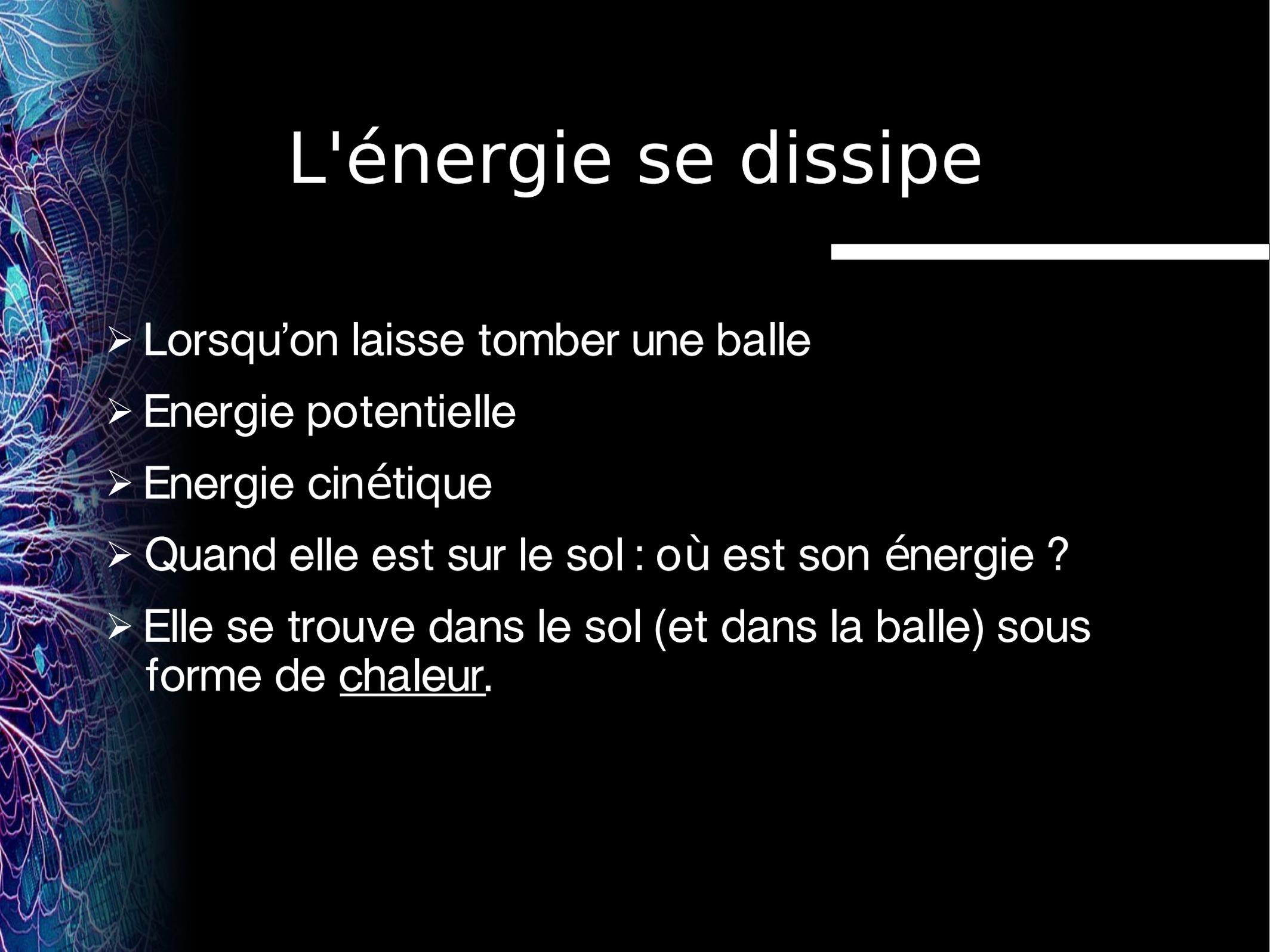
On transforme de l'énergie potentielle électrostatique en lumière et en chaleur.



# Conservation de l'énergie

---

- L'énergie se conserve parce que c'est ce qui se conserve.
- C'est une quantité d'une importance énorme – c'est un outil très puissant pour la compréhension.
- Mais hélas...



# L'énergie se dissipe

---

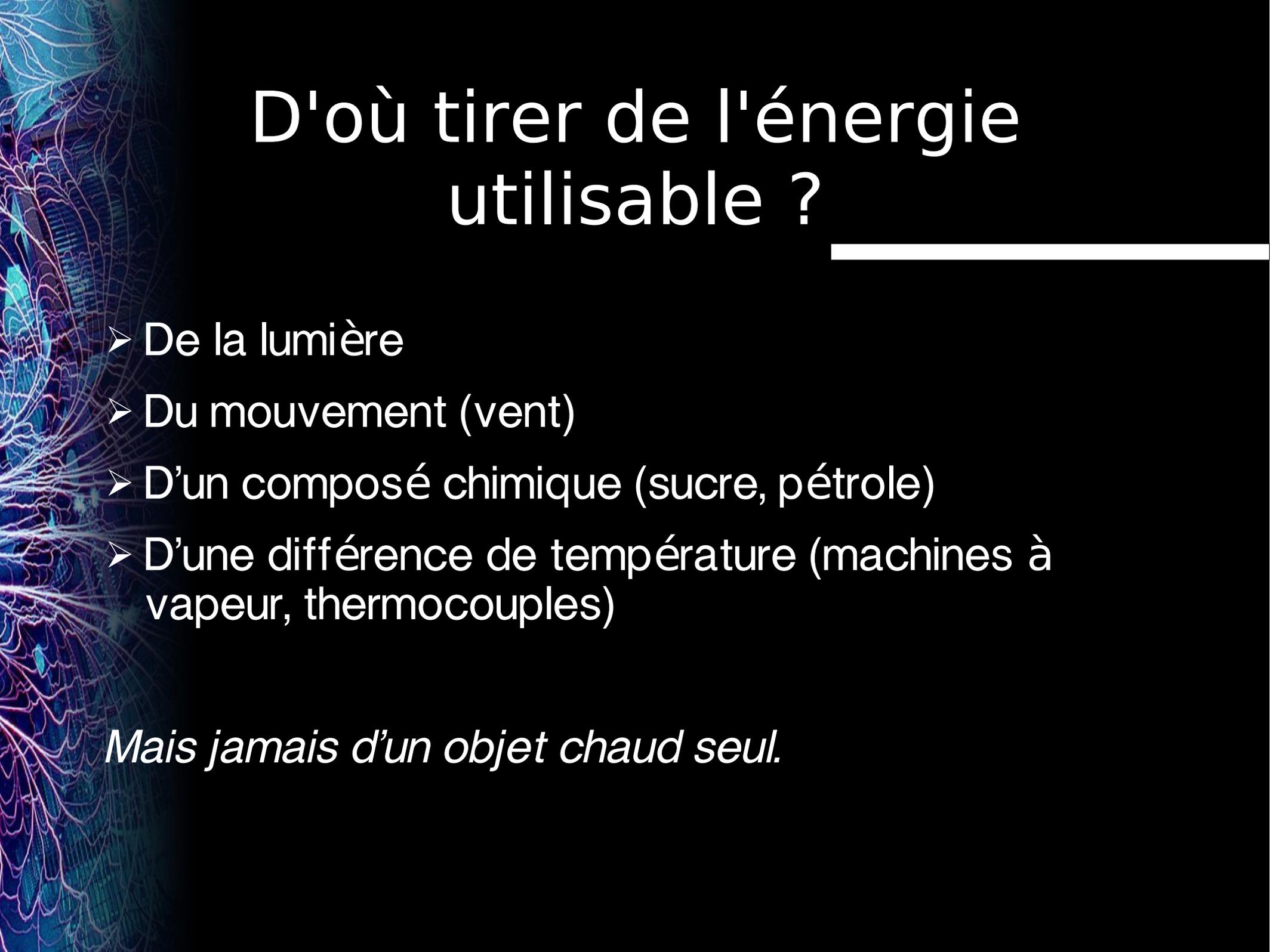
- Lorsqu'on laisse tomber une balle
- Energie potentielle
- Energie cinétique
- Quand elle est sur le sol : où est son énergie ?
- Elle se trouve dans le sol (et dans la balle) sous forme de chaleur.



# Dissipation de l'énergie

---

- Toute l'énergie « bien rangée » finit sous forme de chaleur, équirépartie.
- L'entropie mesure le degré de désordre
- Mais de désordre essentiellement énergétique.

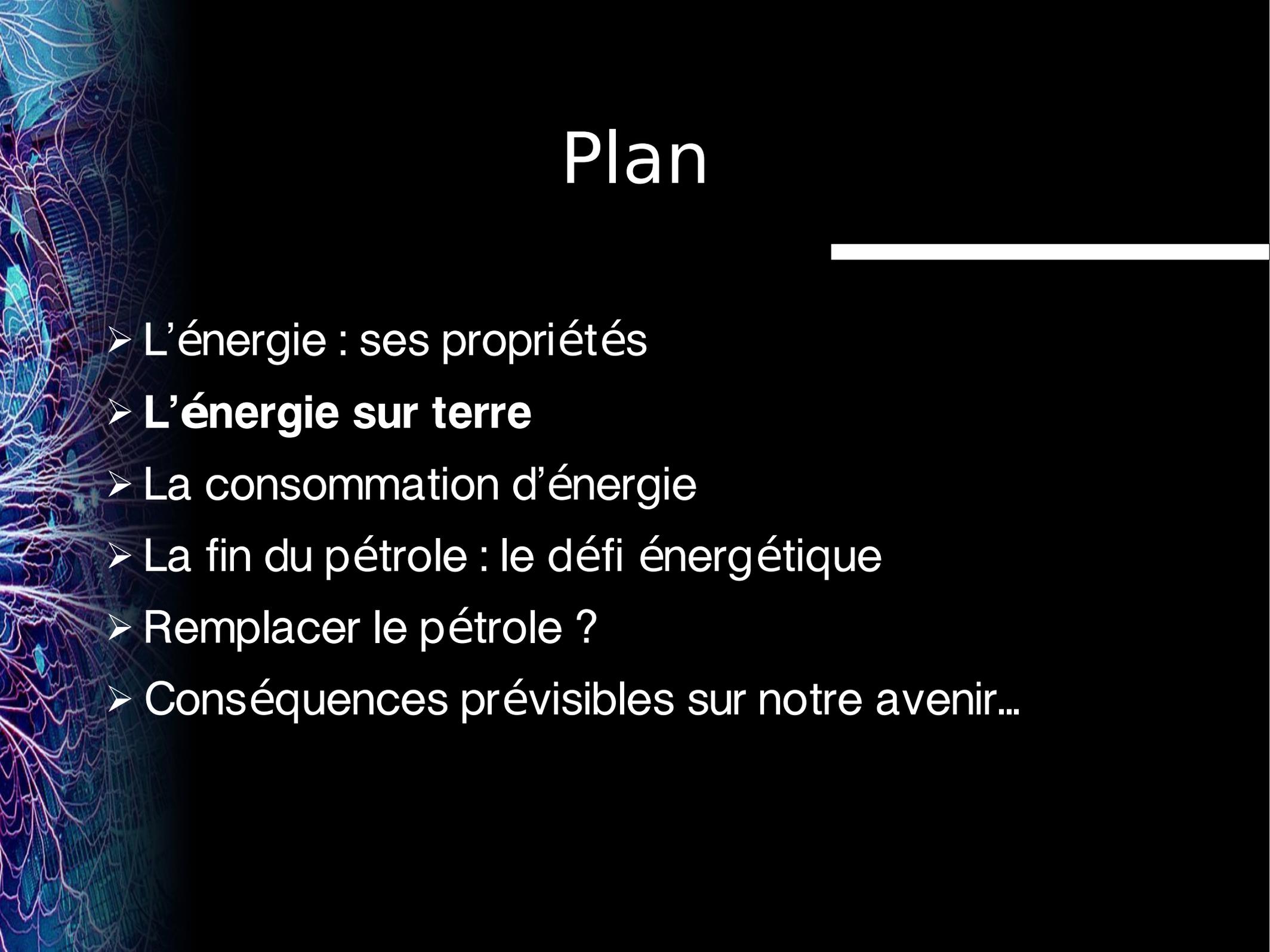


# D'où tirer de l'énergie utilisable ?

---

- De la lumière
- Du mouvement (vent)
- D'un composé chimique (sucre, pétrole)
- D'une différence de température (machines à vapeur, thermocouples)

*Mais jamais d'un objet chaud seul.*



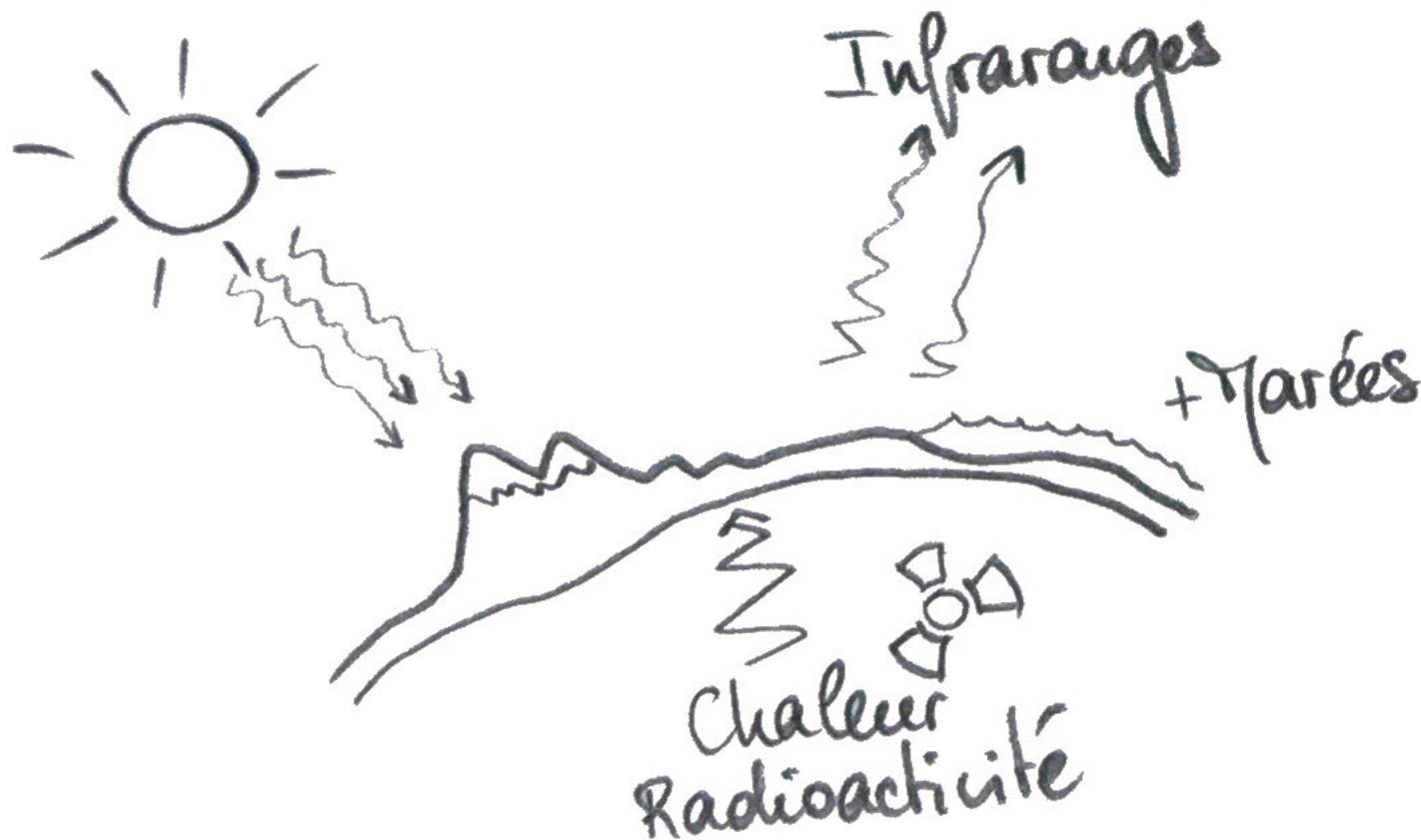
# Plan

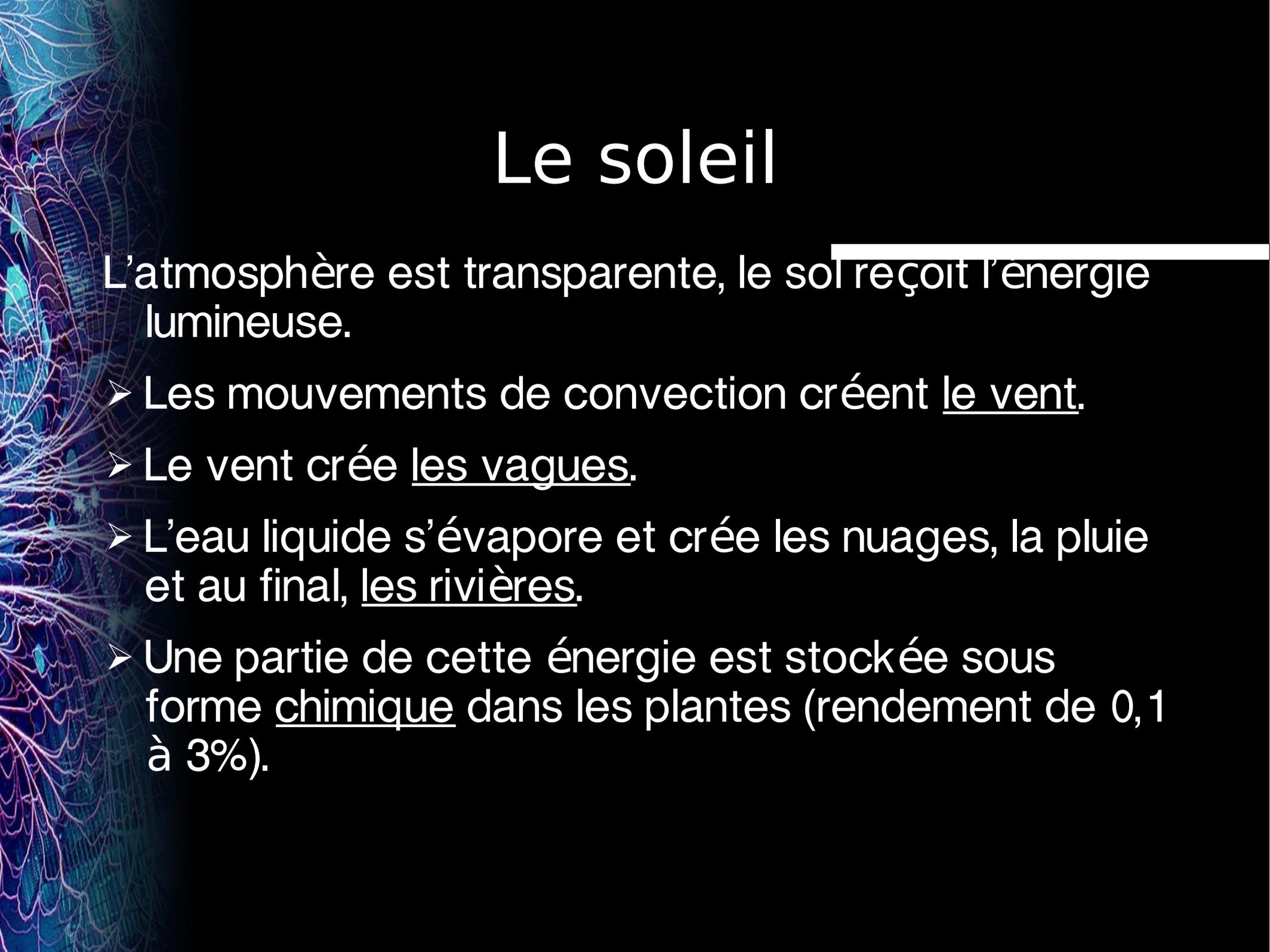
---

- L'énergie : ses propriétés
- **L'énergie sur terre**
- La consommation d'énergie
- La fin du pétrole : le défi énergétique
- Remplacer le pétrole ?
- Conséquences prévisibles sur notre avenir...

# L'énergie sur terre

---

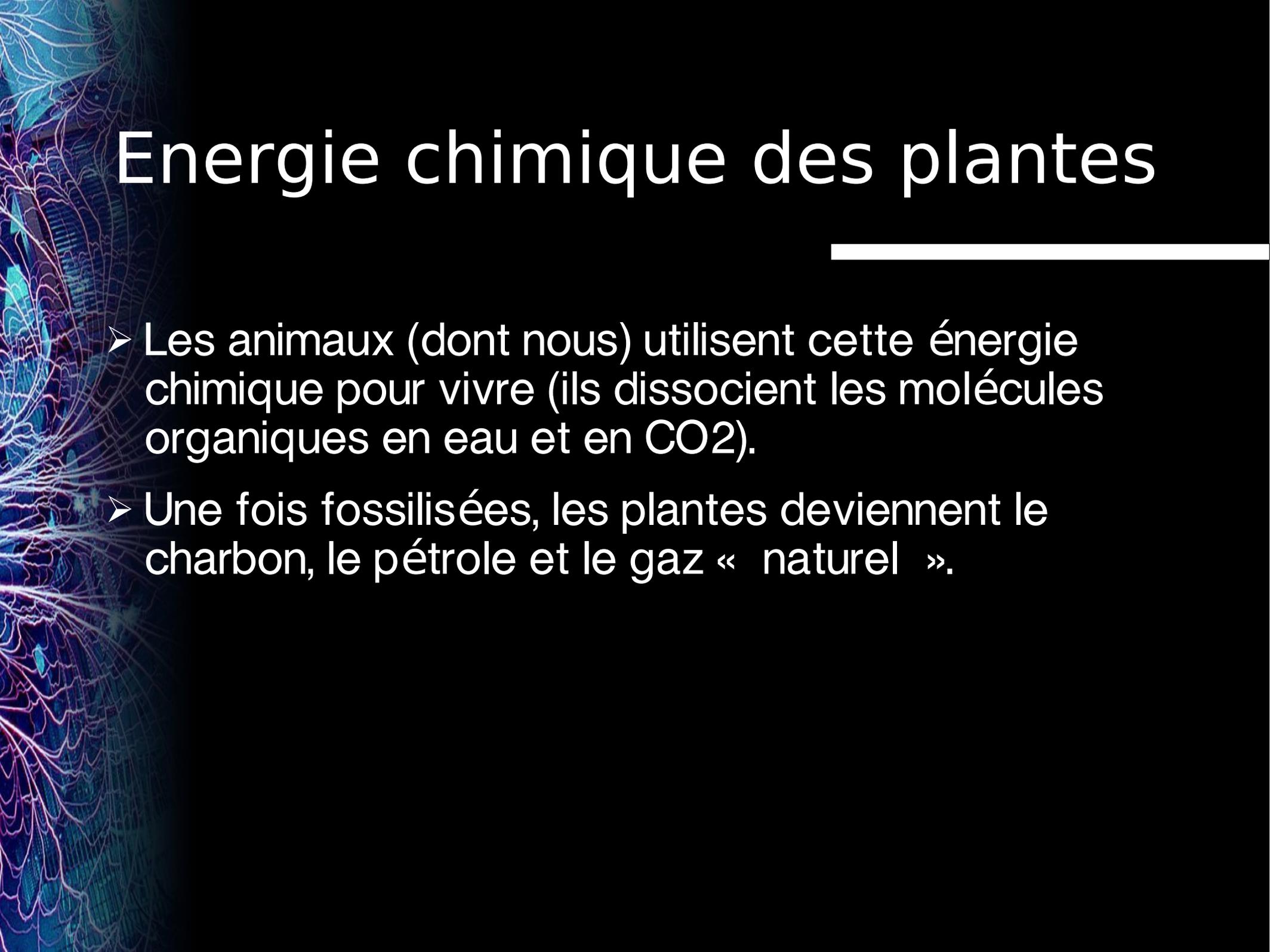




# Le soleil

L'atmosphère est transparente, le sol reçoit l'énergie lumineuse.

- Les mouvements de convection créent le vent.
- Le vent crée les vagues.
- L'eau liquide s'évapore et crée les nuages, la pluie et au final, les rivières.
- Une partie de cette énergie est stockée sous forme chimique dans les plantes (rendement de 0,1 à 3%).



# Energie chimique des plantes

---

- Les animaux (dont nous) utilisent cette énergie chimique pour vivre (ils dissocient les molécules organiques en eau et en CO<sub>2</sub>).
- Une fois fossilisées, les plantes deviennent le charbon, le pétrole et le gaz « naturel ».



# De l'intérieur de la terre

---

- La chaleur dégagée par la radioactivité

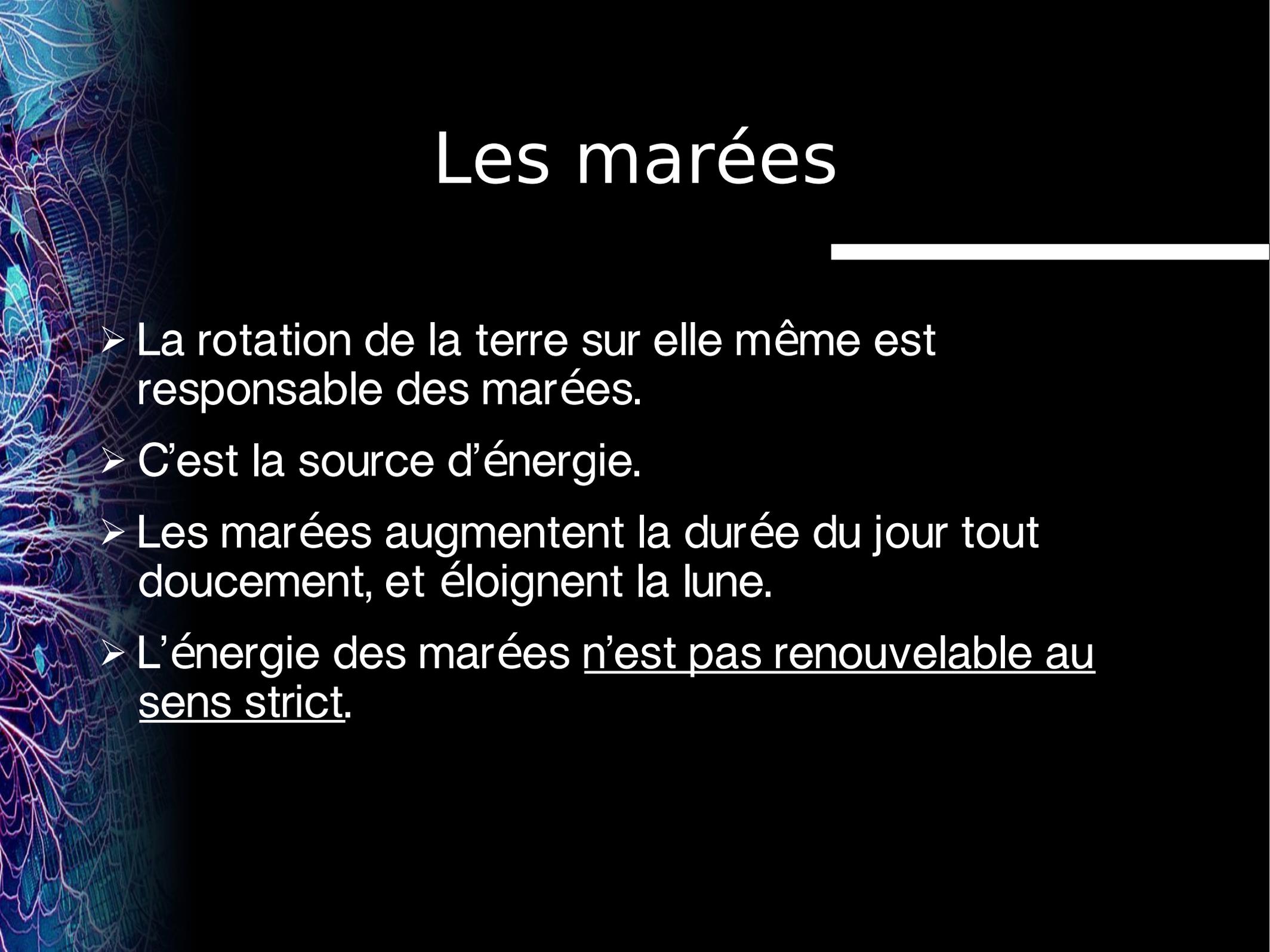
Géothermie

- Les éléments radioactifs eux-mêmes.

Centrales nucléaires (fission)

- Les manifestations des mouvements internes

Volcanisme, tectonique des plaques,  
tremblements de terre, formation de massifs  
montagneux, champ magnétique terrestre.



# Les marées

---

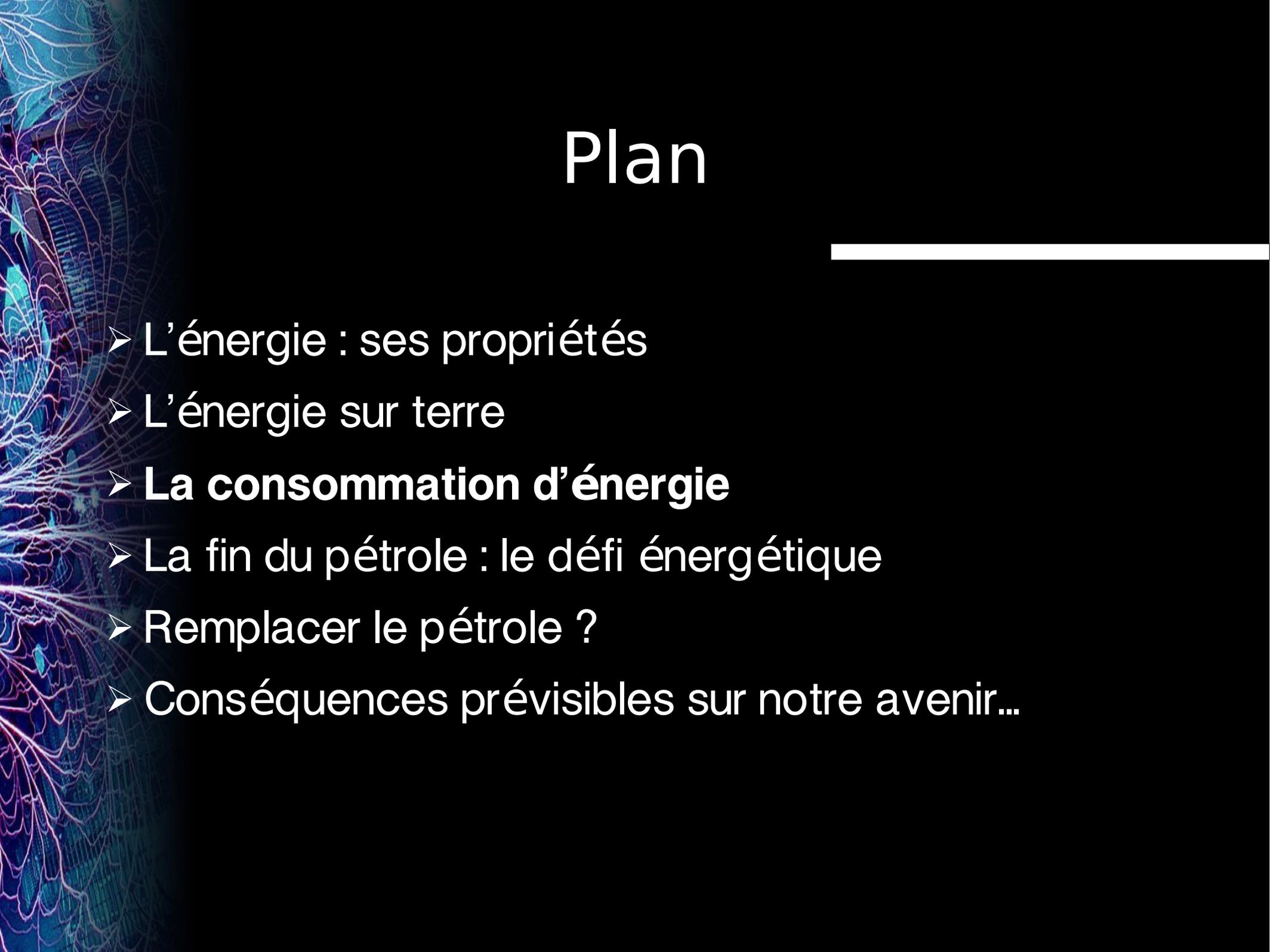
- La rotation de la terre sur elle même est responsable des marées.
- C'est la source d'énergie.
- Les marées augmentent la durée du jour tout doucement, et éloignent la lune.
- L'énergie des marées n'est pas renouvelable au sens strict.



# Infra-rouges

---

- L'énergie reçue finit soit fossilisée, soit dissipée sous forme de chaleur.
- La terre rayonne dans l'infra-rouge.
- Mais l'atmosphère n'est pas aussi transparente à l'infra-rouge : c'est l'effet de serre.
- Sans lui, la terre serait glacée.
- En ce moment, la balance est en déséquilibre : la terre stocke de la chaleur.



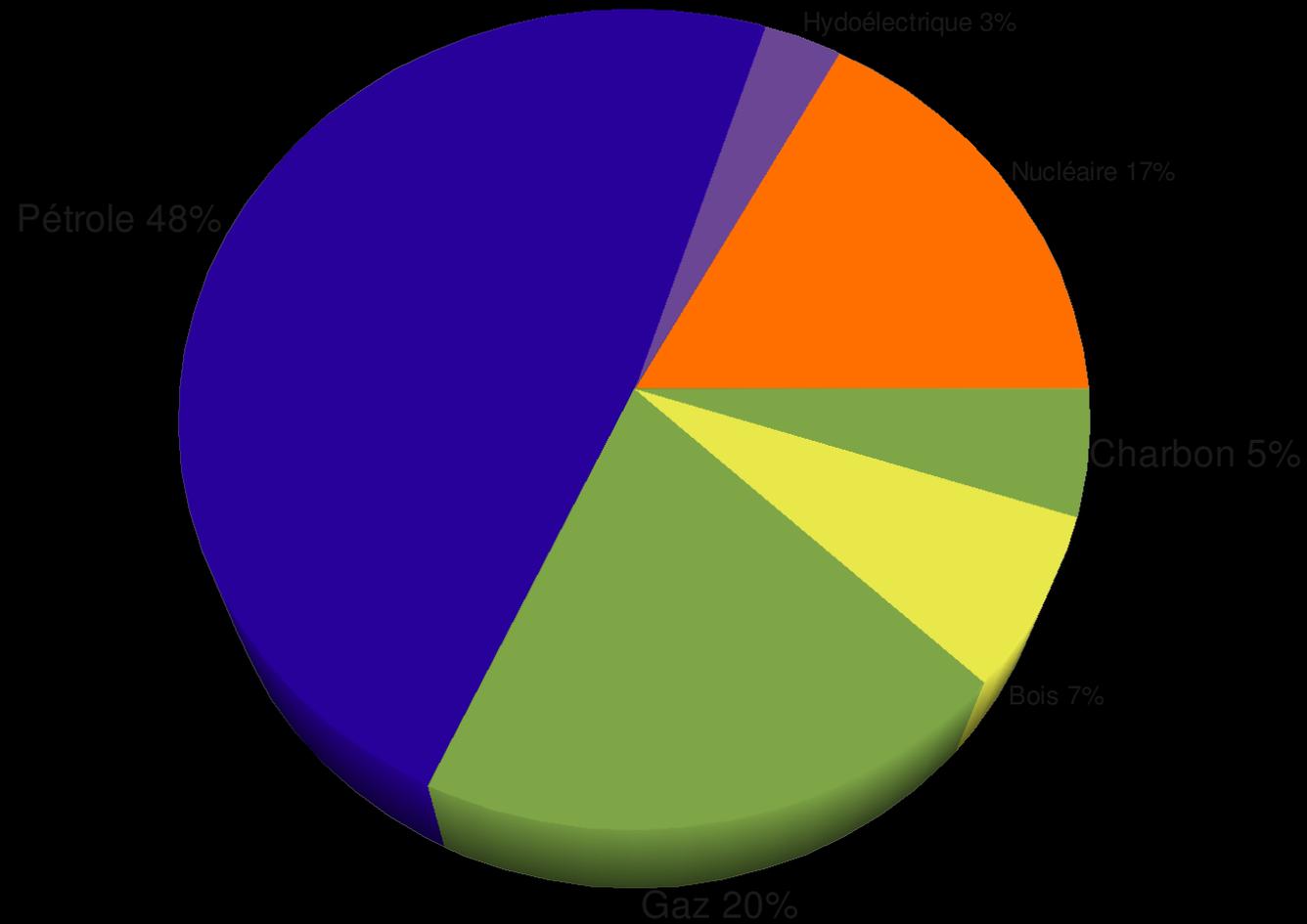
# Plan

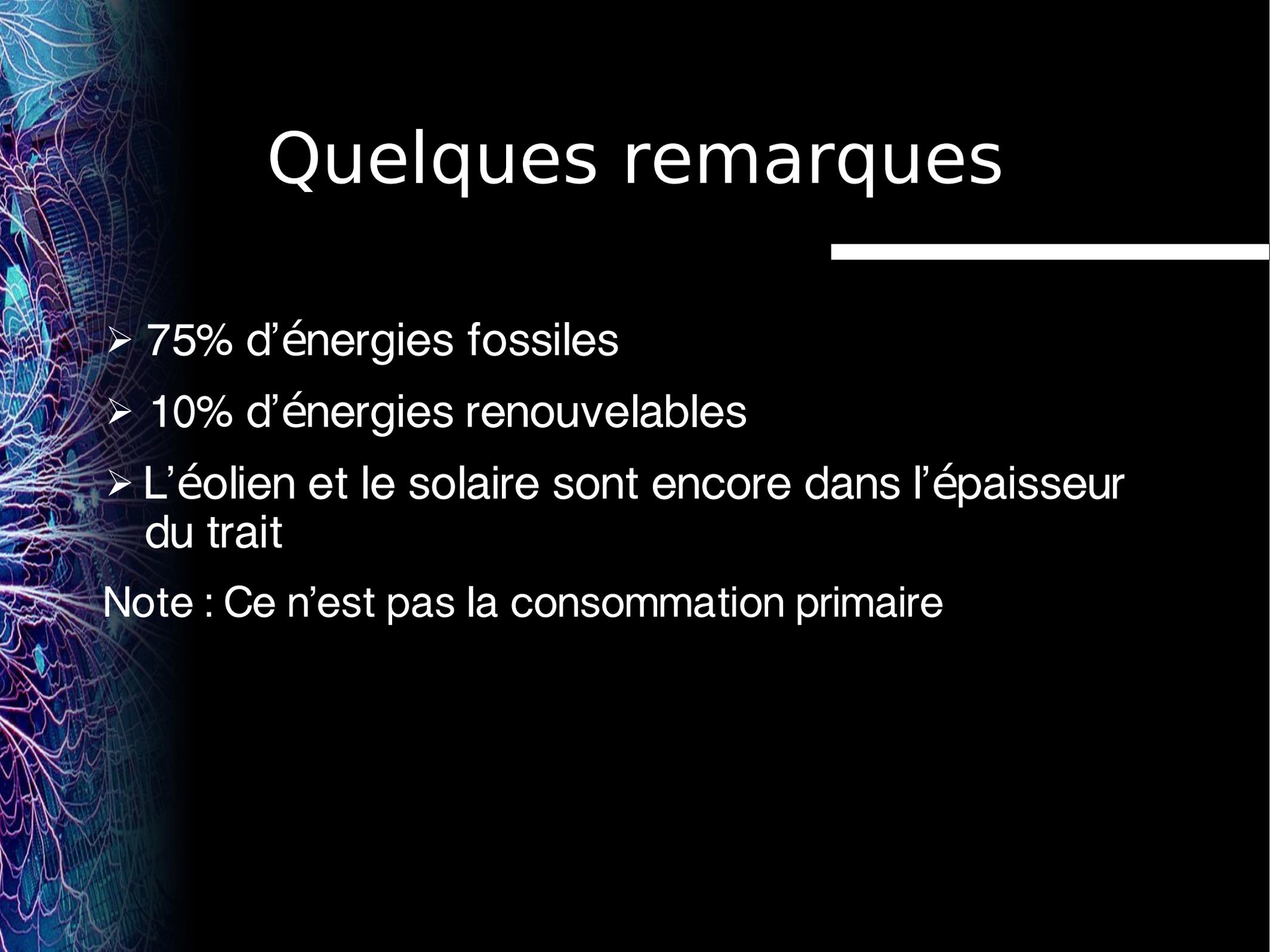
---

- L'énergie : ses propriétés
- L'énergie sur terre
- **La consommation d'énergie**
- La fin du pétrole : le défi énergétique
- Remplacer le pétrole ?
- Conséquences prévisibles sur notre avenir...

# Consommation énergétique finale

---





# Quelques remarques

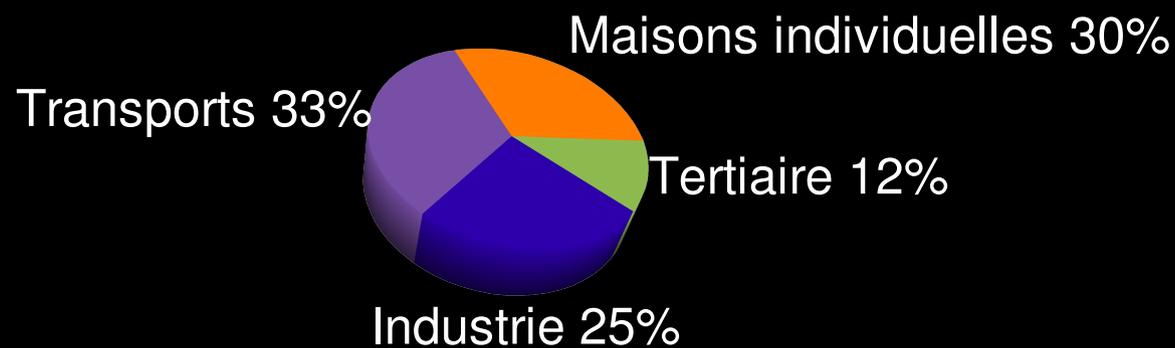
---

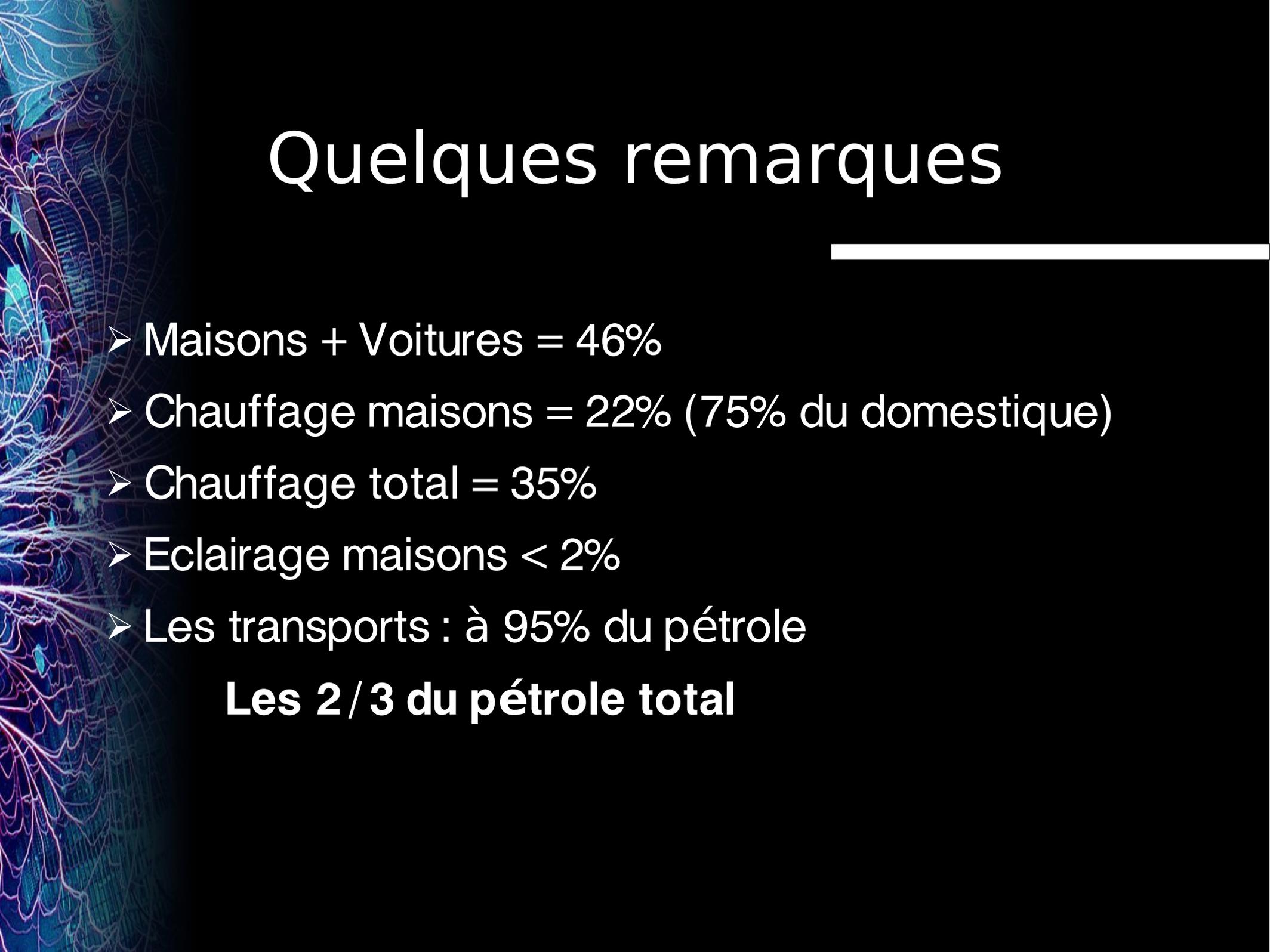
- 75% d'énergies fossiles
- 10% d'énergies renouvelables
- L'éolien et le solaire sont encore dans l'épaisseur du trait

Note : Ce n'est pas la consommation primaire

# Par qui ? Pour quoi faire ?

---





# Quelques remarques

---

- Maisons + Voitures = 46%
- Chauffage maisons = 22% (75% du domestique)
- Chauffage total = 35%
- Eclairage maisons < 2%
- Les transports : à 95% du pétrole

**Les 2/3 du pétrole total**

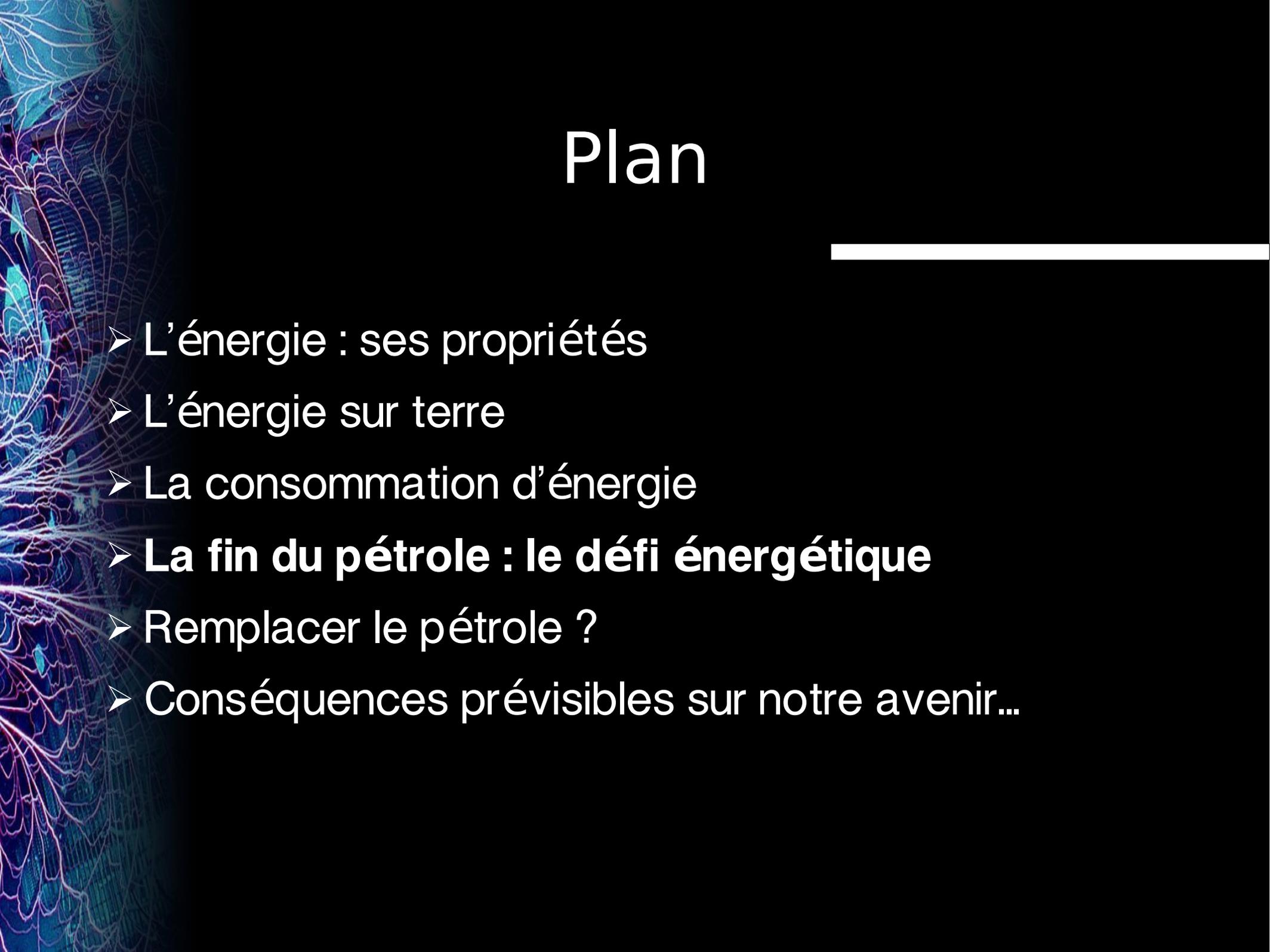


# Pourquoi tant de pétrole ?

---

La densité énergétique du pétrole est **inégalée**.

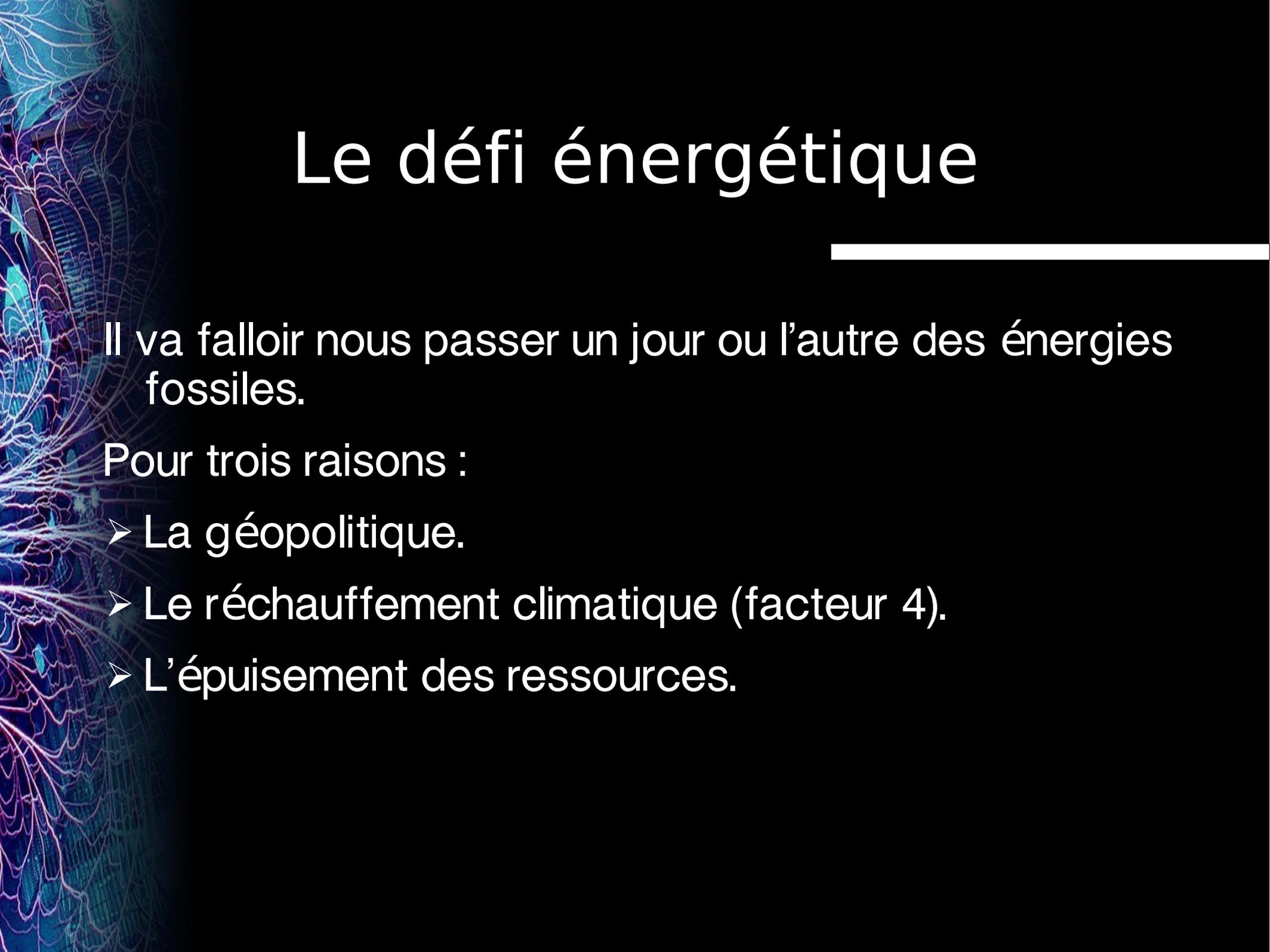
- Large autonomie des véhicules
- Véhicules lourds
- Permet de faire voler un avion !



# Plan

---

- L'énergie : ses propriétés
- L'énergie sur terre
- La consommation d'énergie
- **La fin du pétrole : le défi énergétique**
- Remplacer le pétrole ?
- Conséquences prévisibles sur notre avenir...



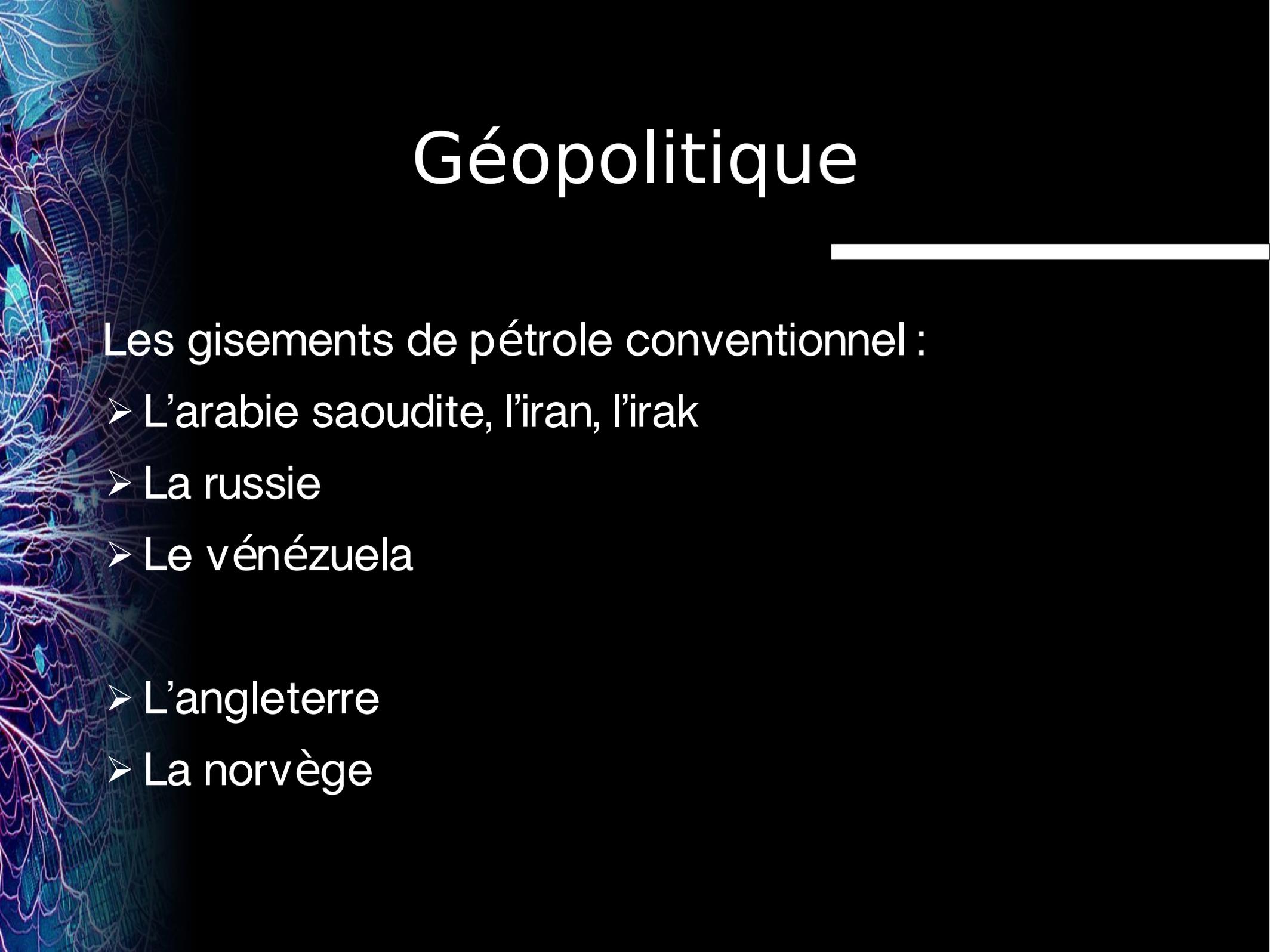
# Le défi énergétique

---

Il va falloir nous passer un jour ou l'autre des énergies fossiles.

Pour trois raisons :

- La géopolitique.
- Le réchauffement climatique (facteur 4).
- L'épuisement des ressources.

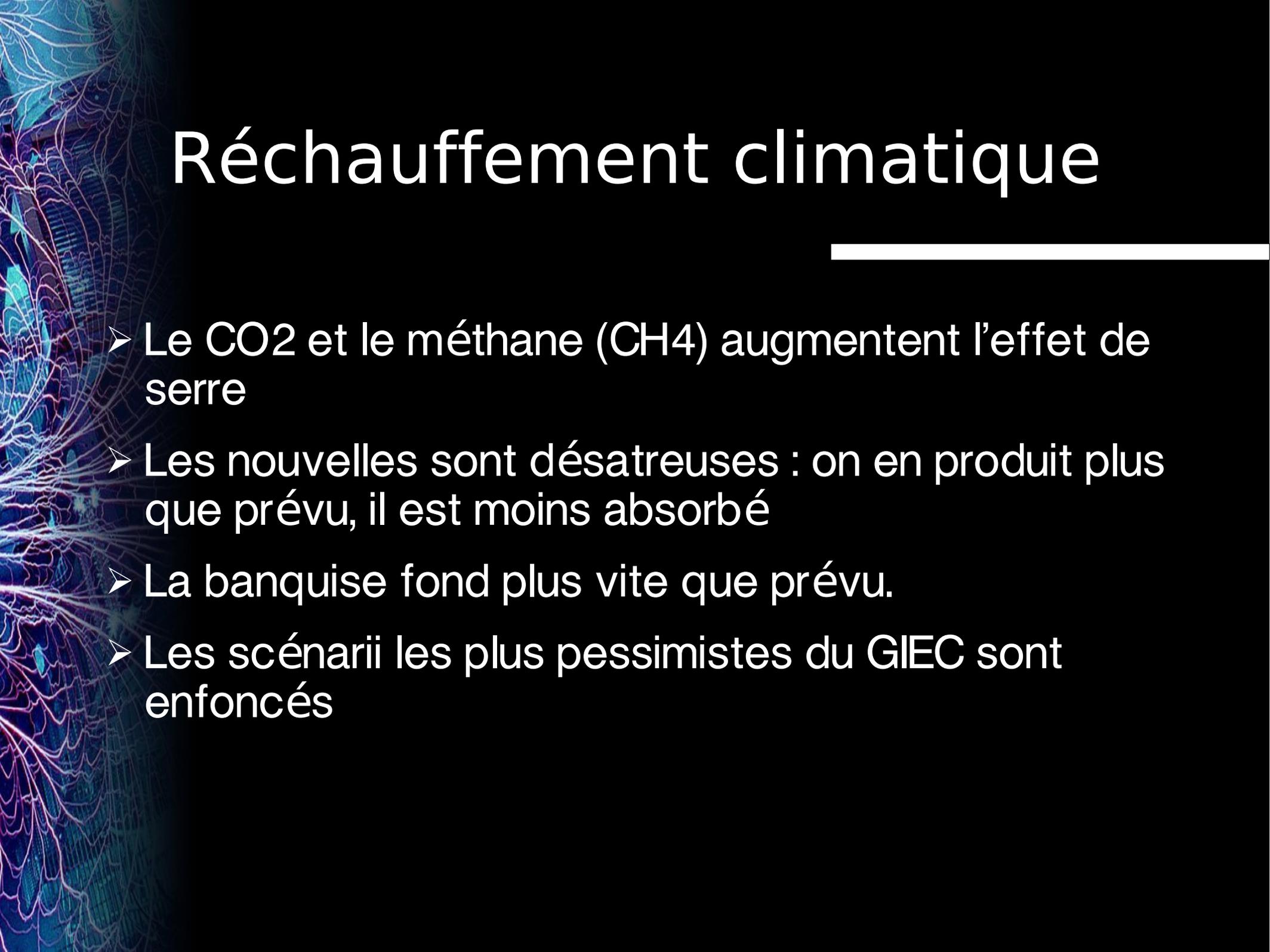


# Géopolitique

---

Les gisements de pétrole conventionnel :

- L'arabie saoudite, l'iran, l'irak
- La russie
- Le vénézuéla
  
- L'angleterre
- La norvège



# Réchauffement climatique

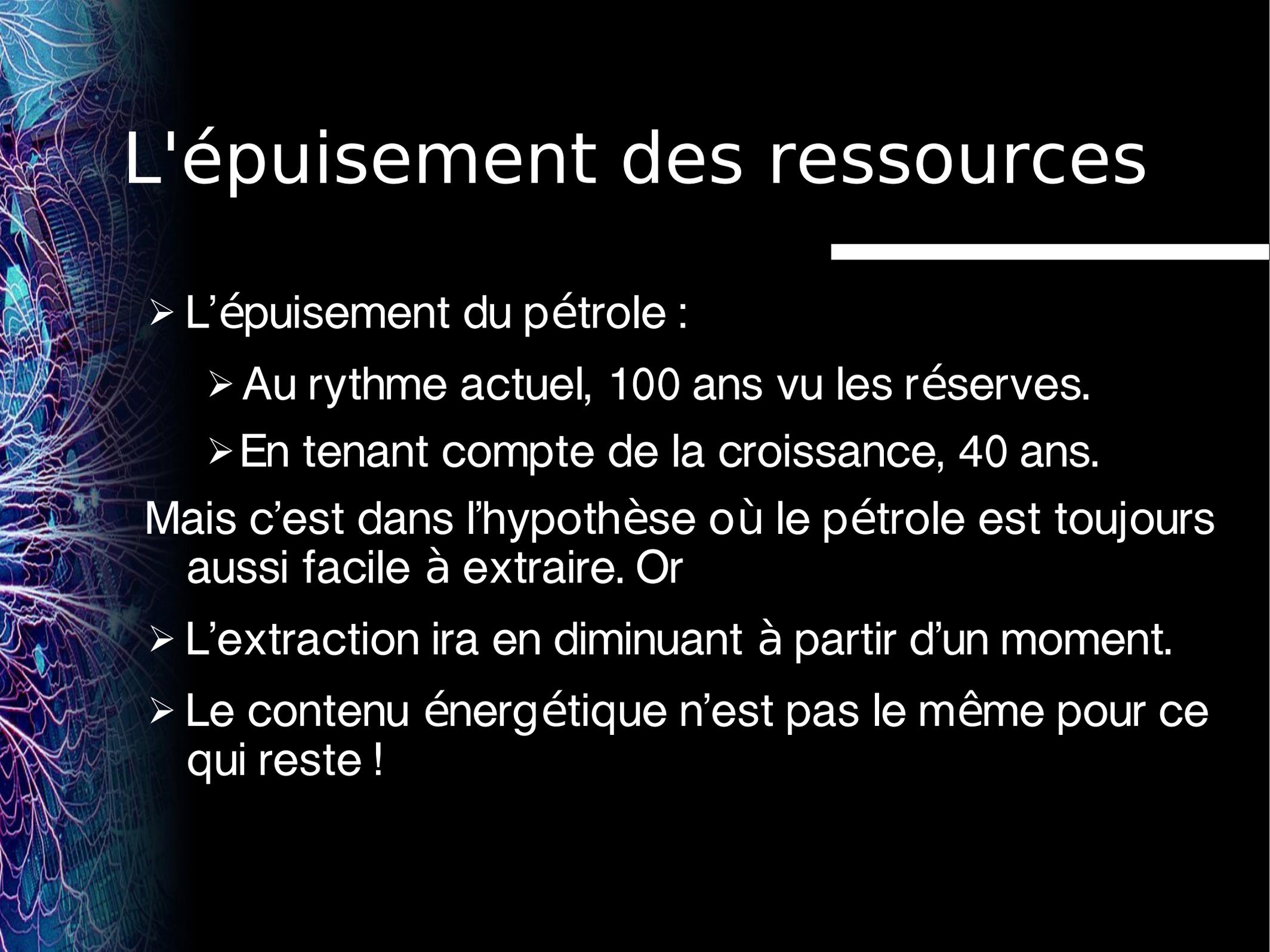
---

- Le CO<sub>2</sub> et le méthane (CH<sub>4</sub>) augmentent l'effet de serre
- Les nouvelles sont désastreuses : on en produit plus que prévu, il est moins absorbé
- La banquise fond plus vite que prévu.
- Les scénarii les plus pessimistes du GIEC sont enfoncés

# Le facteur 4

---

- Pour limiter le réchauffement climatique, il faudra qu'on ait divisé d'un facteur 4 nos émissions de CO<sub>2</sub> par rapport à 1990 en 2050.
- Globalement, il faut empêcher un réchauffement climatique trop important.
- Les scénarii les plus pessimistes du GIEC étaient trop optimistes.



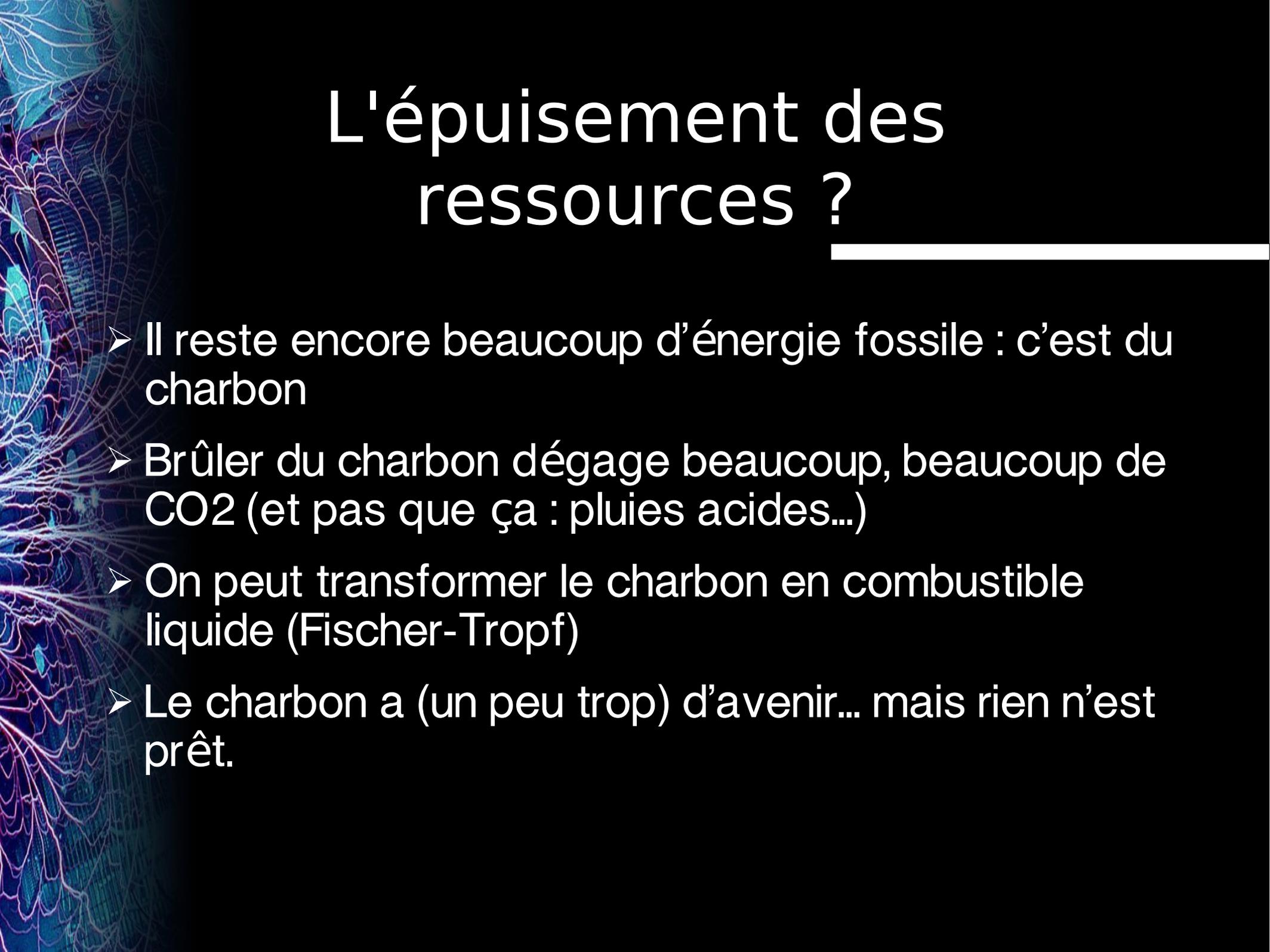
# L'épuisement des ressources

---

- L'épuisement du pétrole :
  - Au rythme actuel, 100 ans vu les réserves.
  - En tenant compte de la croissance, 40 ans.

Mais c'est dans l'hypothèse où le pétrole est toujours aussi facile à extraire. Or

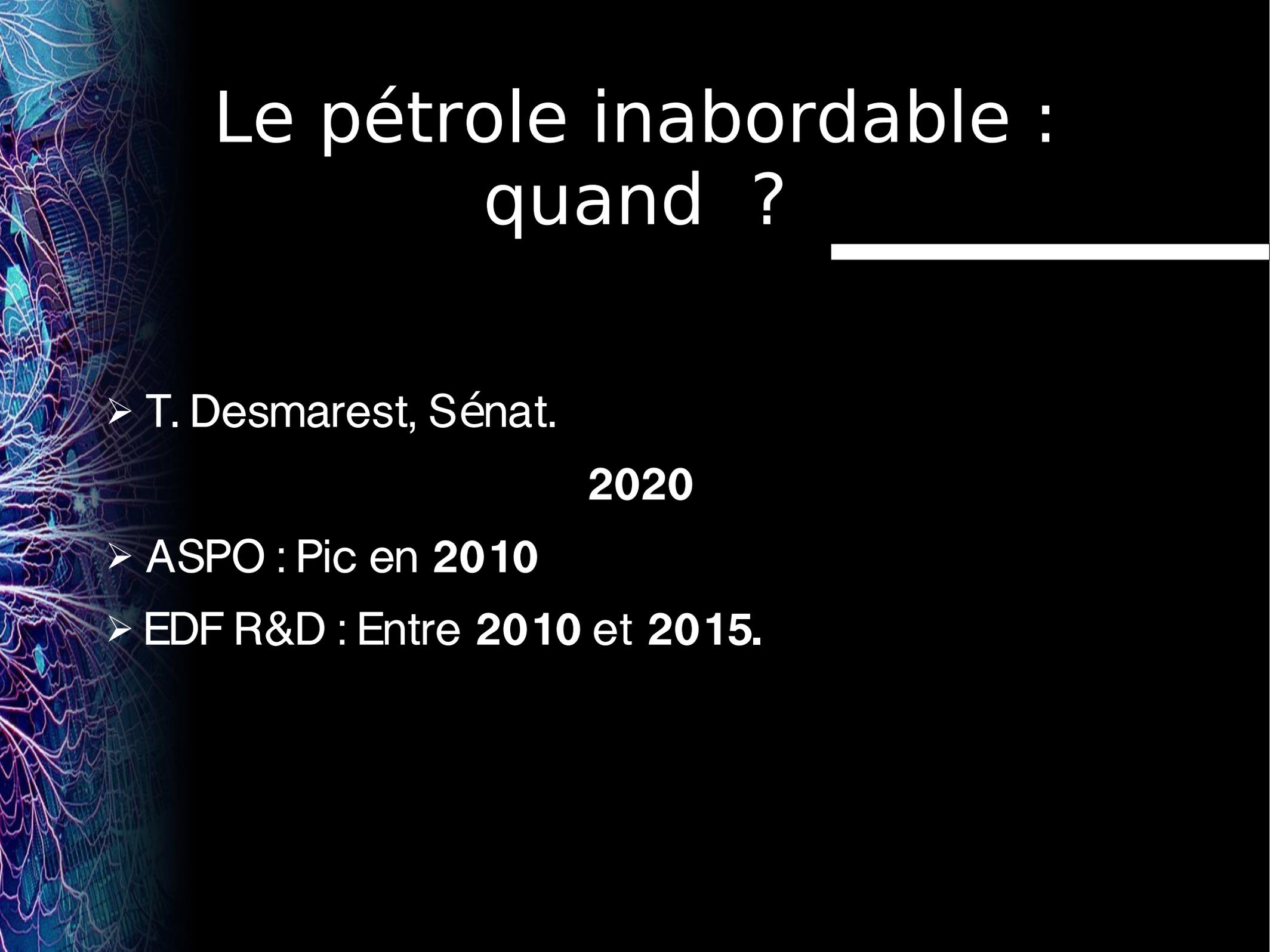
- L'extraction ira en diminuant à partir d'un moment.
- Le contenu énergétique n'est pas le même pour ce qui reste !



# L'épuisement des ressources ?

---

- Il reste encore beaucoup d'énergie fossile : c'est du charbon
- Brûler du charbon dégage beaucoup, beaucoup de CO<sub>2</sub> (et pas que ça : pluies acides...)
- On peut transformer le charbon en combustible liquide (Fischer-Tropf)
- Le charbon a (un peu trop) d'avenir... mais rien n'est prêt.



# Le pétrole inabordable : quand ?

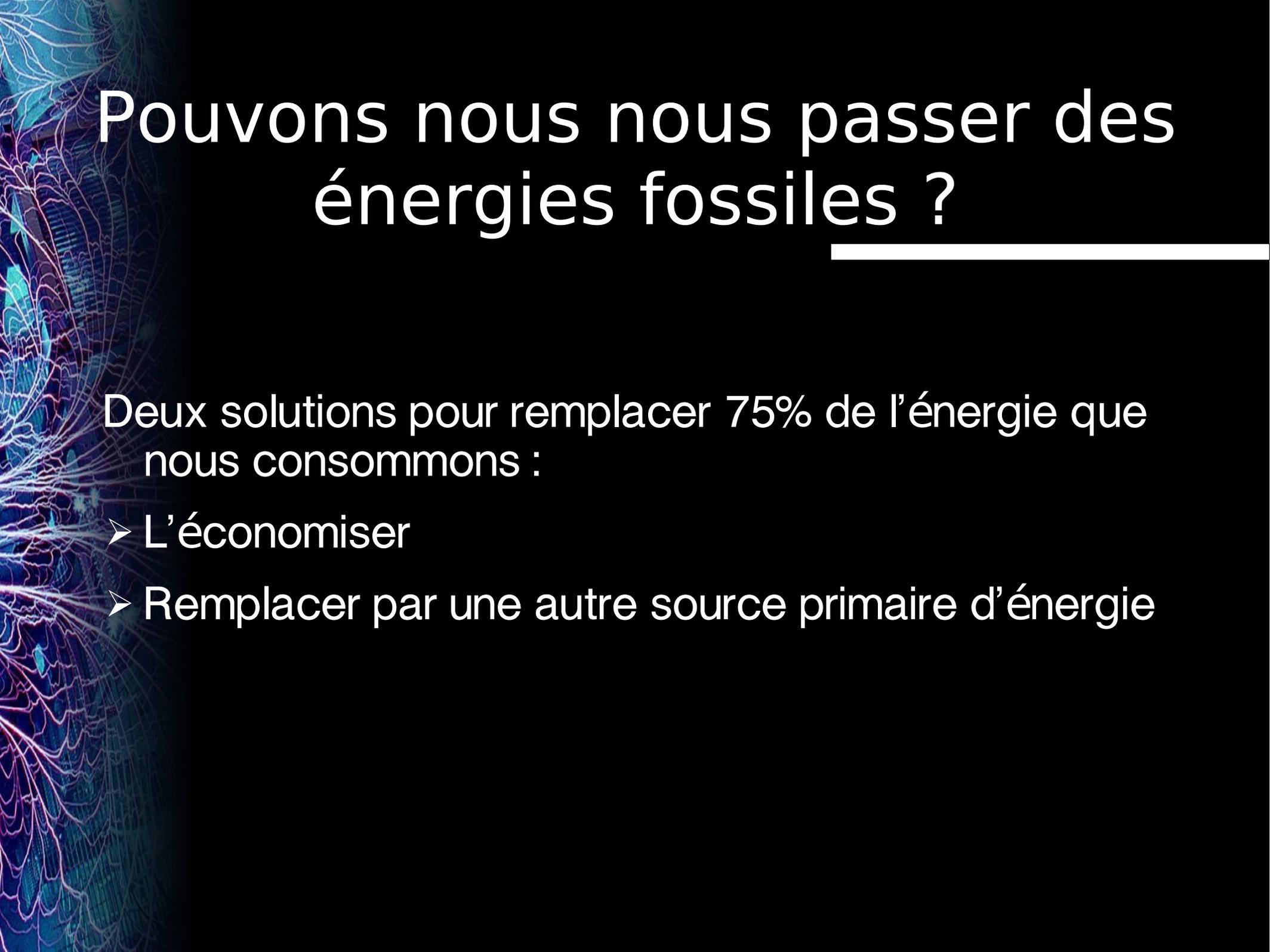
---

➤ T. Desmarest, Sénat.

**2020**

➤ ASPO : Pic en **2010**

➤ EDF R&D : Entre **2010** et **2015**.

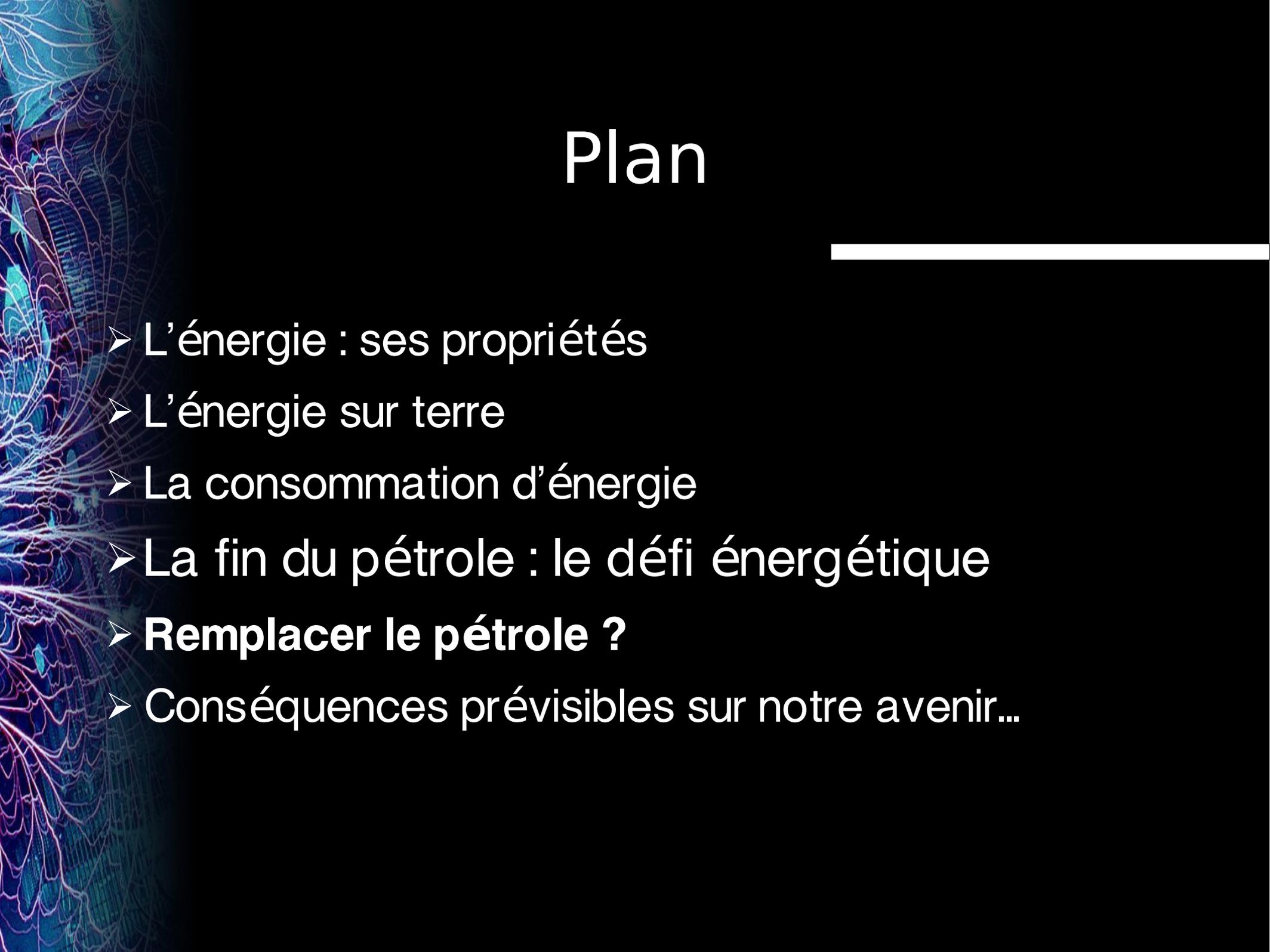


# Pouvons nous nous passer des énergies fossiles ?

---

Deux solutions pour remplacer 75% de l'énergie que nous consommons :

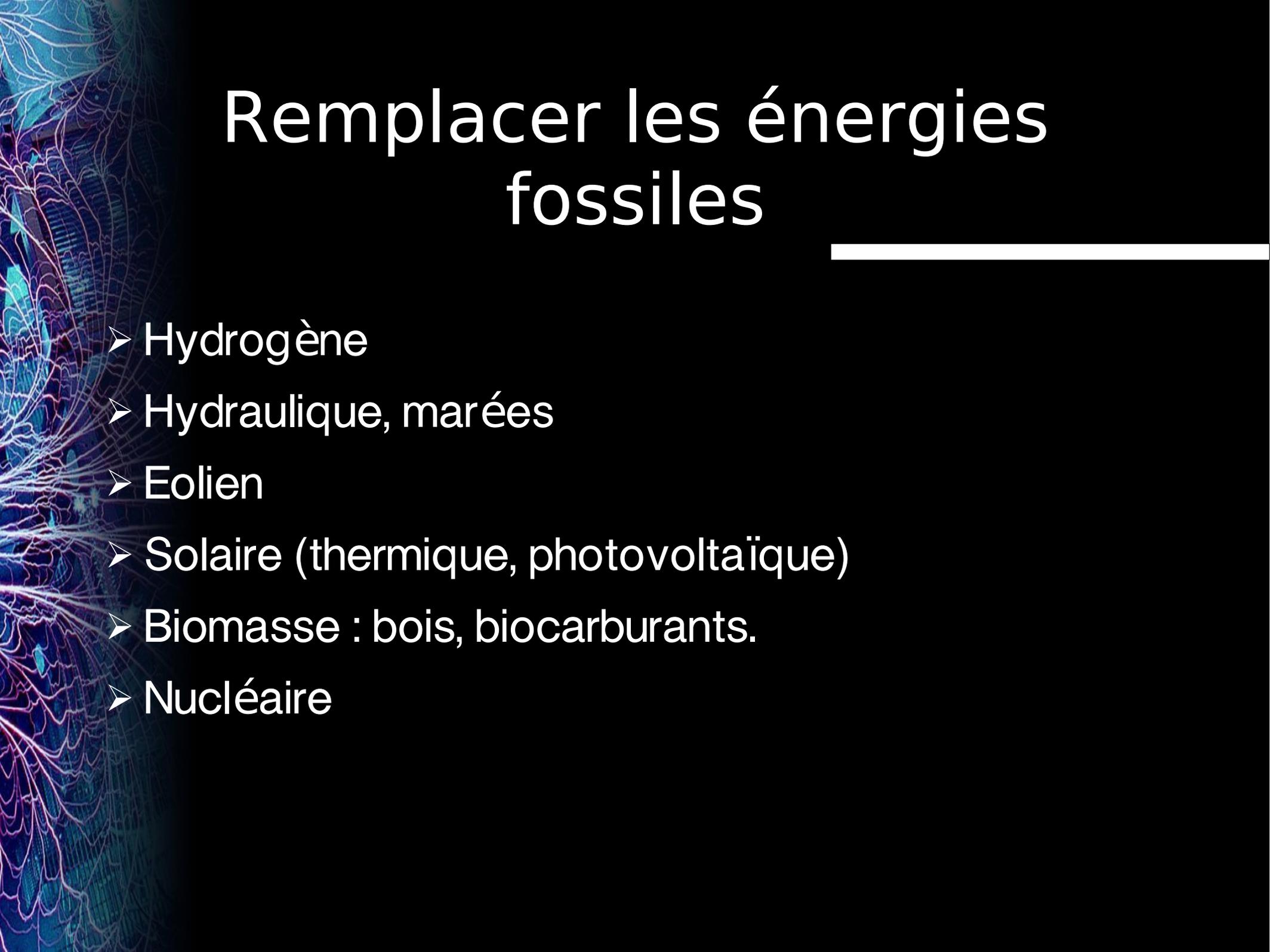
- L'économiser
- Remplacer par une autre source primaire d'énergie



# Plan

---

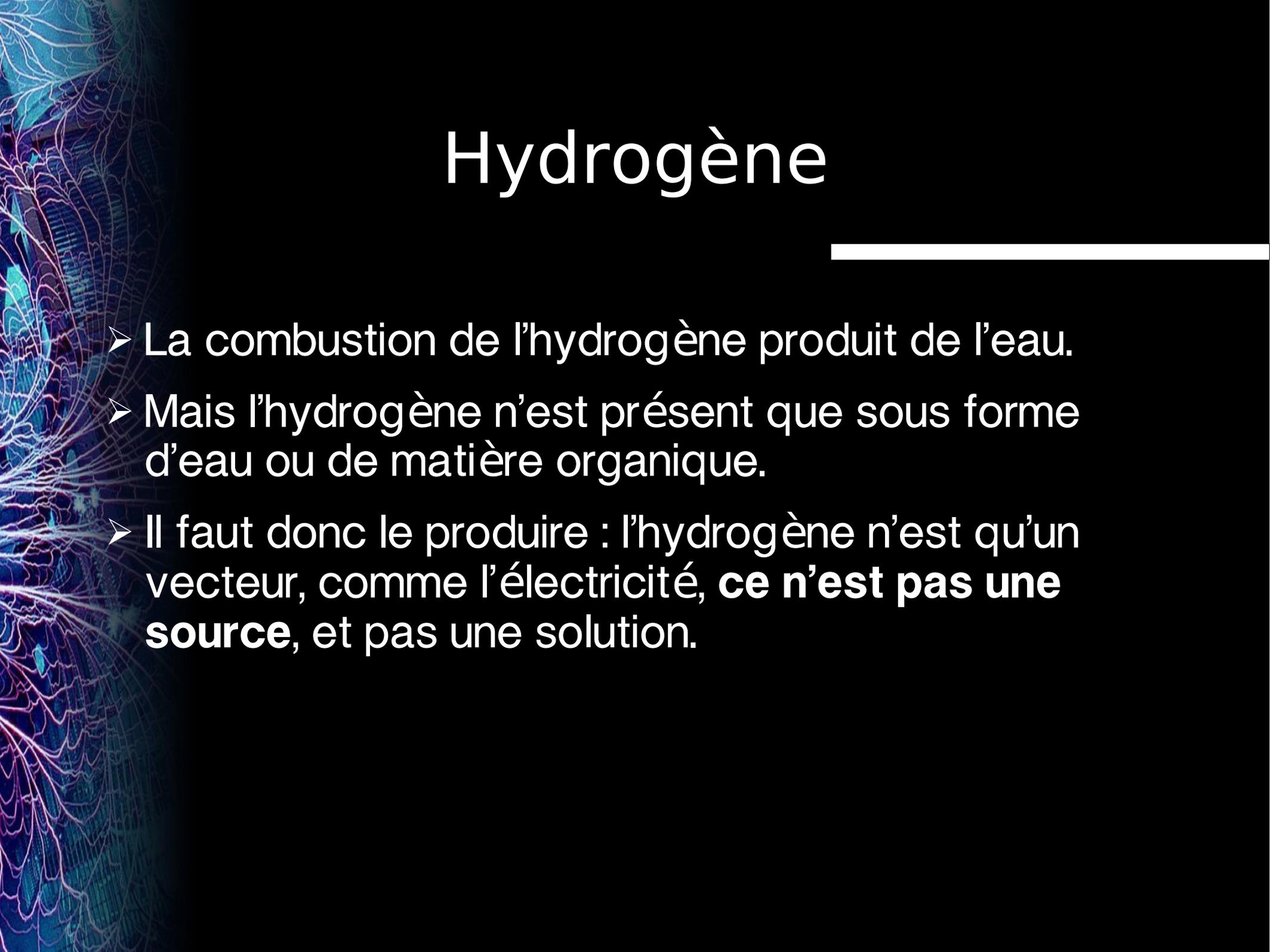
- L'énergie : ses propriétés
- L'énergie sur terre
- La consommation d'énergie
- La fin du pétrole : le défi énergétique
- **Remplacer le pétrole ?**
- Conséquences prévisibles sur notre avenir...



# Remplacer les énergies fossiles

---

- Hydrogène
- Hydraulique, marées
- Eolien
- Solaire (thermique, photovoltaïque)
- Biomasse : bois, biocarburants.
- Nucléaire



# Hydrogène

---

- La combustion de l'hydrogène produit de l'eau.
- Mais l'hydrogène n'est présent que sous forme d'eau ou de matière organique.
- Il faut donc le produire : l'hydrogène n'est qu'un vecteur, comme l'électricité, **ce n'est pas une source**, et pas une solution.



# D'autres « serpents de mer »

---

- Production par des bactéries
  - Hydrogène
  - Méthane
- Production par de l'aluminium
  - Aluminium + eau = Hydrogène

# Hydro-électricité (1)

---

- L'hydraulique a plein de qualités
  - Facilité de stockage
  - Disponibilité immédiate
  - Réversible !
- La France est au maximum de ses capacités ou presque. Pas plus de 3% de notre consommation.

# Hydro-électricité (2)

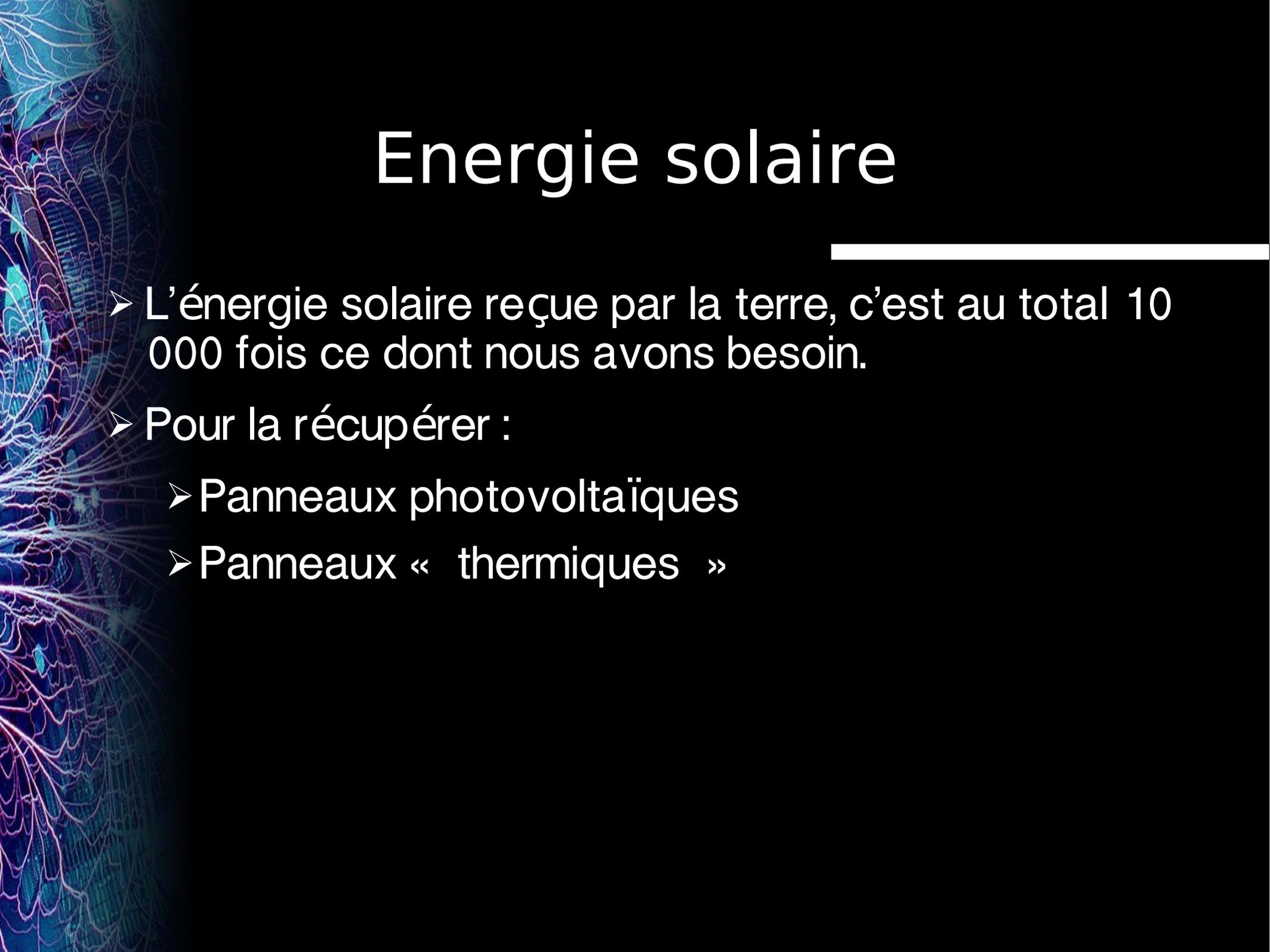
---

- Les usines marémotrices ont besoin de sites très spécifiques.
- Elles resteront marginales.
- Les hydroliennes peuvent être un élément de solution (8% de notre production électrique, soit 2% de notre consommation totale)
- Dans l'absolu, ce n'est pas une énergie renouvelable – mais à une échelle de temps énorme.

# Eolien

---

- A condition d'installer plusieurs centaines de milliers d'éoliennes, dans le midi ou sur les côtes bretonnes et normandes surtout.
- Production maximum raisonnable : 10% de notre production d'électricité actuelle.
- Potentiel : 2% de notre consommation
- Une place imméritée dans les média ?



# Energie solaire

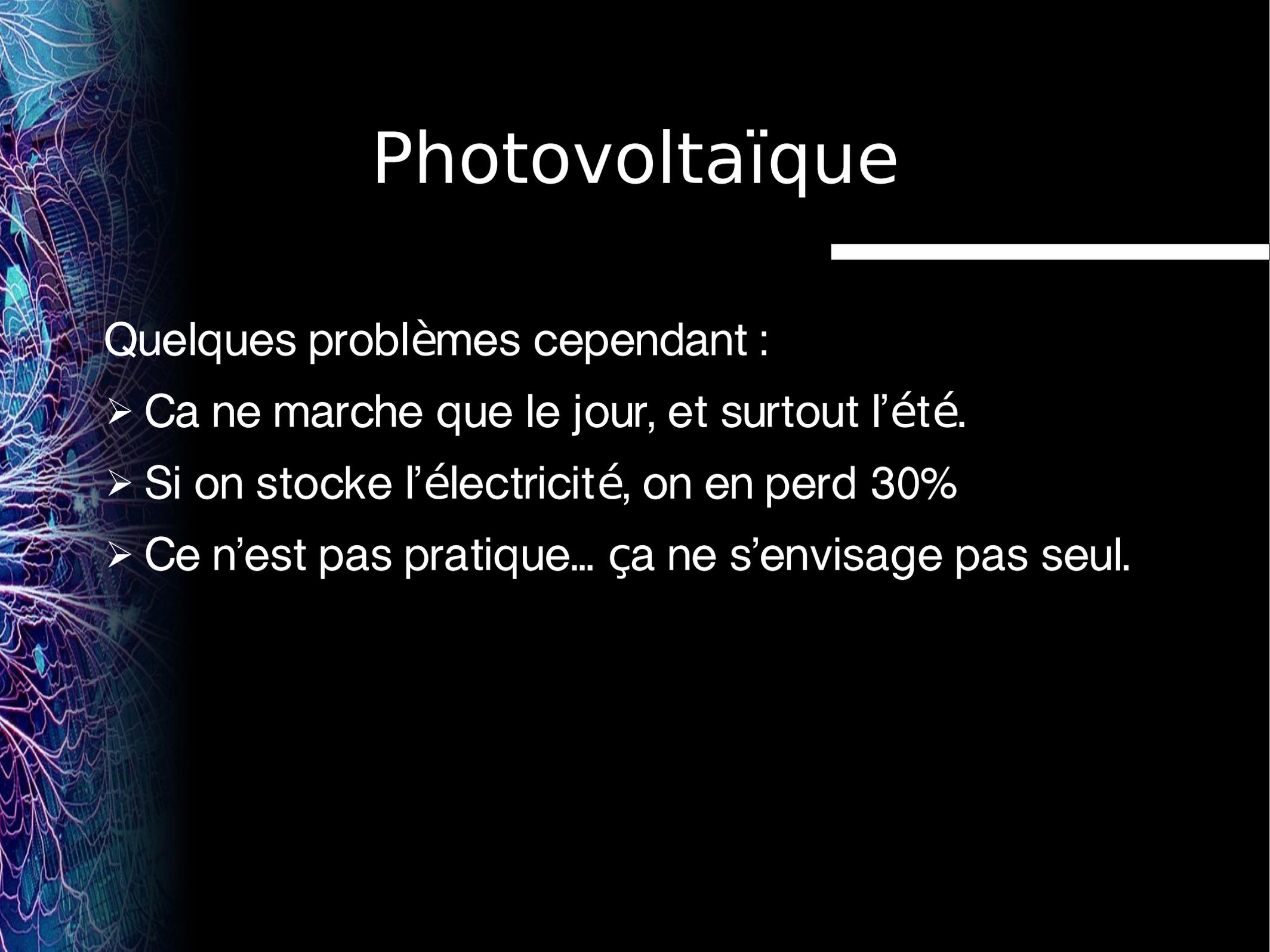
---

- L'énergie solaire reçue par la terre, c'est au total 10 000 fois ce dont nous avons besoin.
- Pour la récupérer :
  - Panneaux photovoltaïques
  - Panneaux « thermiques »

# Photovoltaïque

---

- Si on couvrait les toits de France de panneaux photovoltaïques ( $r=15\%$ ) on pourrait couvrir l'équivalent de notre consommation d'électricité ! (20% de notre consommation)
- Mais il faut 4 ans de production du panneau pour fournir le suivant
- Donc 4 ans de notre production électrique pour le faire une première fois.

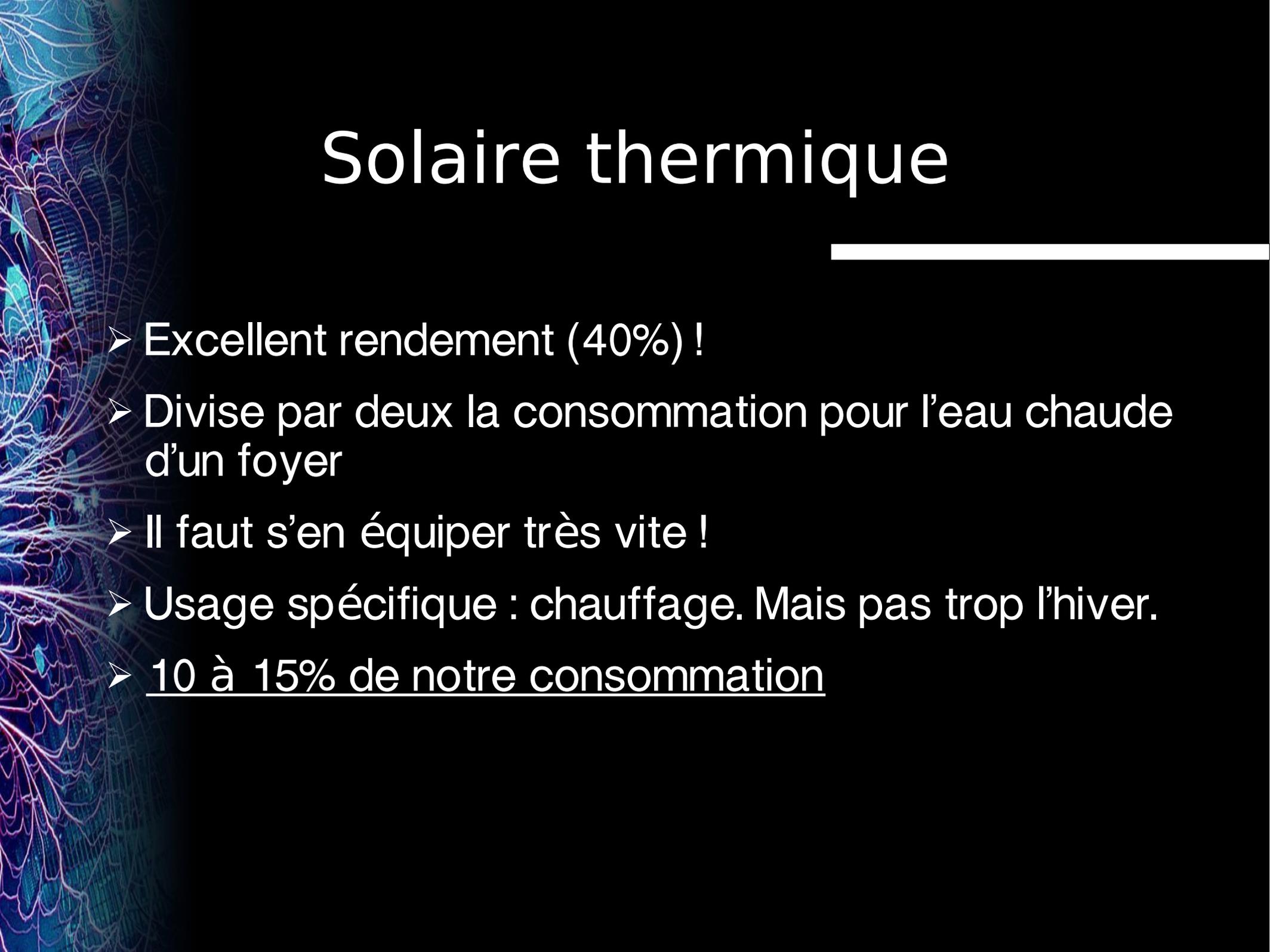


# Photovoltaïque

---

Quelques problèmes cependant :

- Ca ne marche que le jour, et surtout l'été.
- Si on stocke l'électricité, on en perd 30%
- Ce n'est pas pratique... ça ne s'envisage pas seul.



# Solaire thermique

---

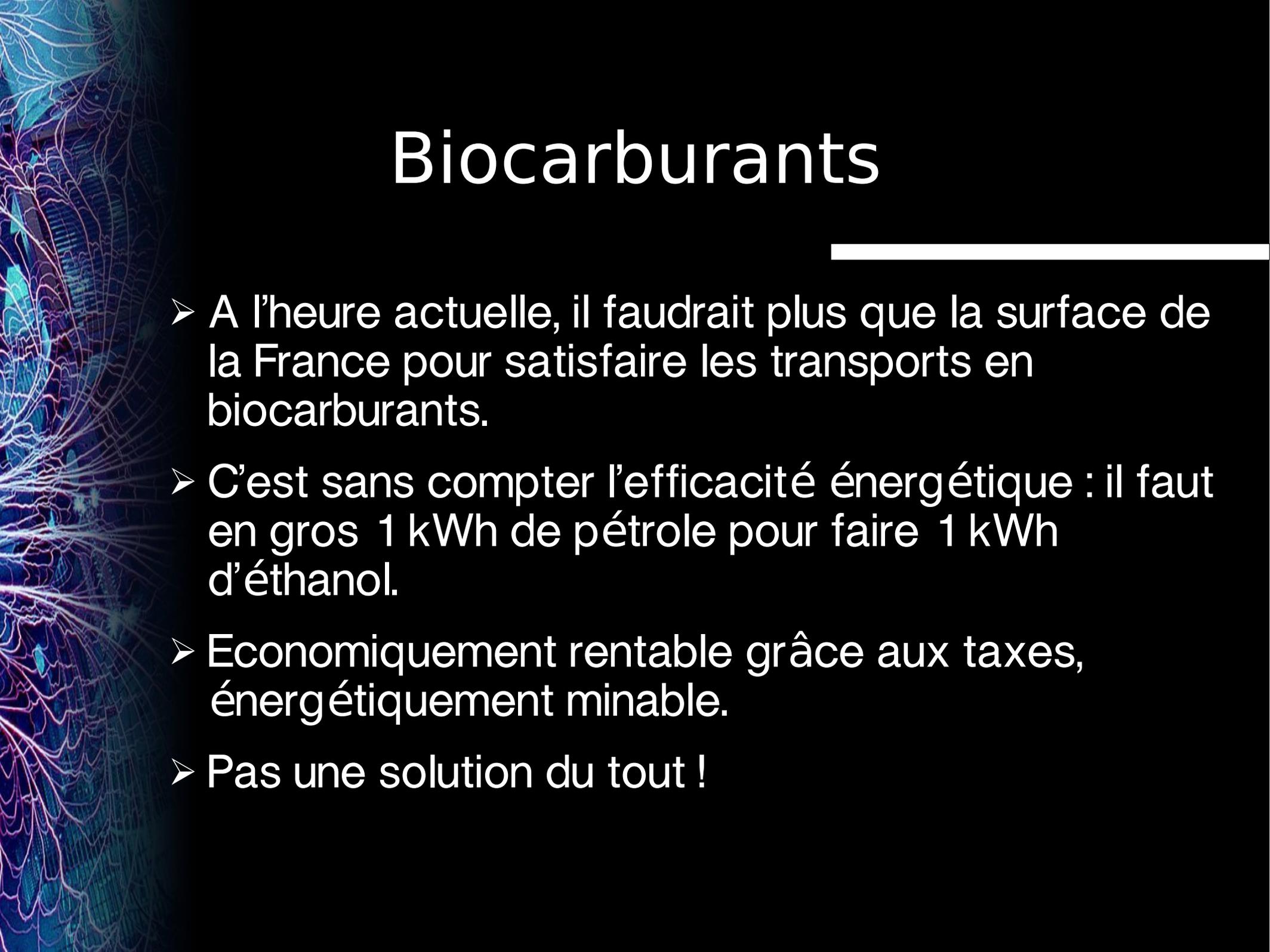
- Excellent rendement (40%) !
- Divise par deux la consommation pour l'eau chaude d'un foyer
- Il faut s'en équiper très vite !
- Usage spécifique : chauffage. Mais pas trop l'hiver.
- 10 à 15% de notre consommation



# Bois

---

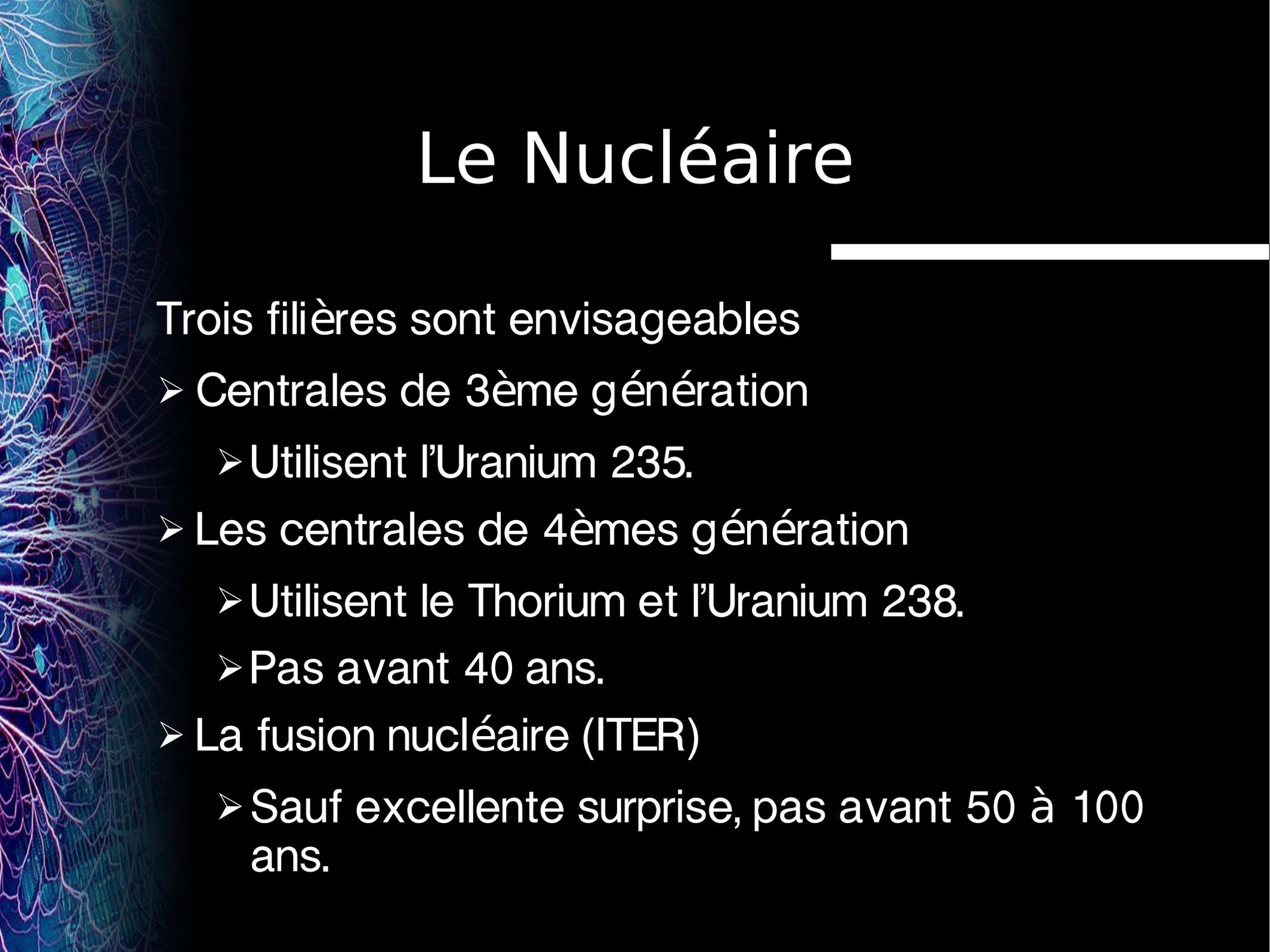
- Bois : on ne pourra pas faire beaucoup plus.
- Pour que nous nous chauffions tous au bois, il faudrait y consacrer 25% du territoire.
- Potentiel : 10% de notre consommation.
- Surtout pour le chauffage.



# Biocarburants

---

- A l'heure actuelle, il faudrait plus que la surface de la France pour satisfaire les transports en biocarburants.
- C'est sans compter l'efficacité énergétique : il faut en gros 1 kWh de pétrole pour faire 1 kWh d'éthanol.
- Economiquement rentable grâce aux taxes, énergétiquement minable.
- Pas une solution du tout !

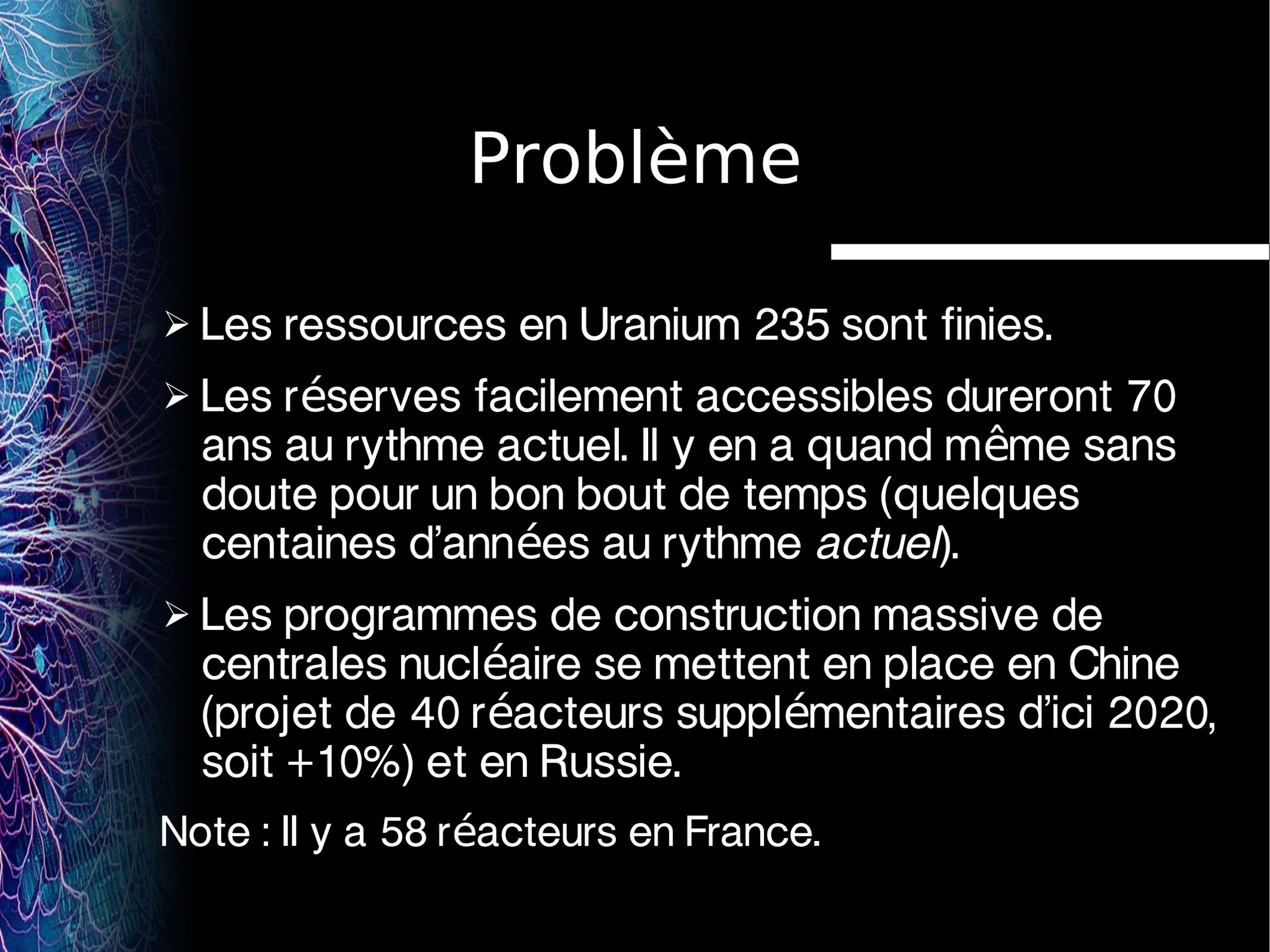


# Le Nucléaire

---

Trois filières sont envisageables

- Centrales de 3ème génération
  - Utilisent l'Uranium 235.
- Les centrales de 4èmes génération
  - Utilisent le Thorium et l'Uranium 238.
  - Pas avant 40 ans.
- La fusion nucléaire (ITER)
  - Sauf excellente surprise, pas avant 50 à 100 ans.



# Problème

---

- Les ressources en Uranium 235 sont finies.
- Les réserves facilement accessibles dureront 70 ans au rythme actuel. Il y en a quand même sans doute pour un bon bout de temps (quelques centaines d'années au rythme *actuel*).
- Les programmes de construction massive de centrales nucléaires se mettent en place en Chine (projet de 40 réacteurs supplémentaires d'ici 2020, soit +10%) et en Russie.

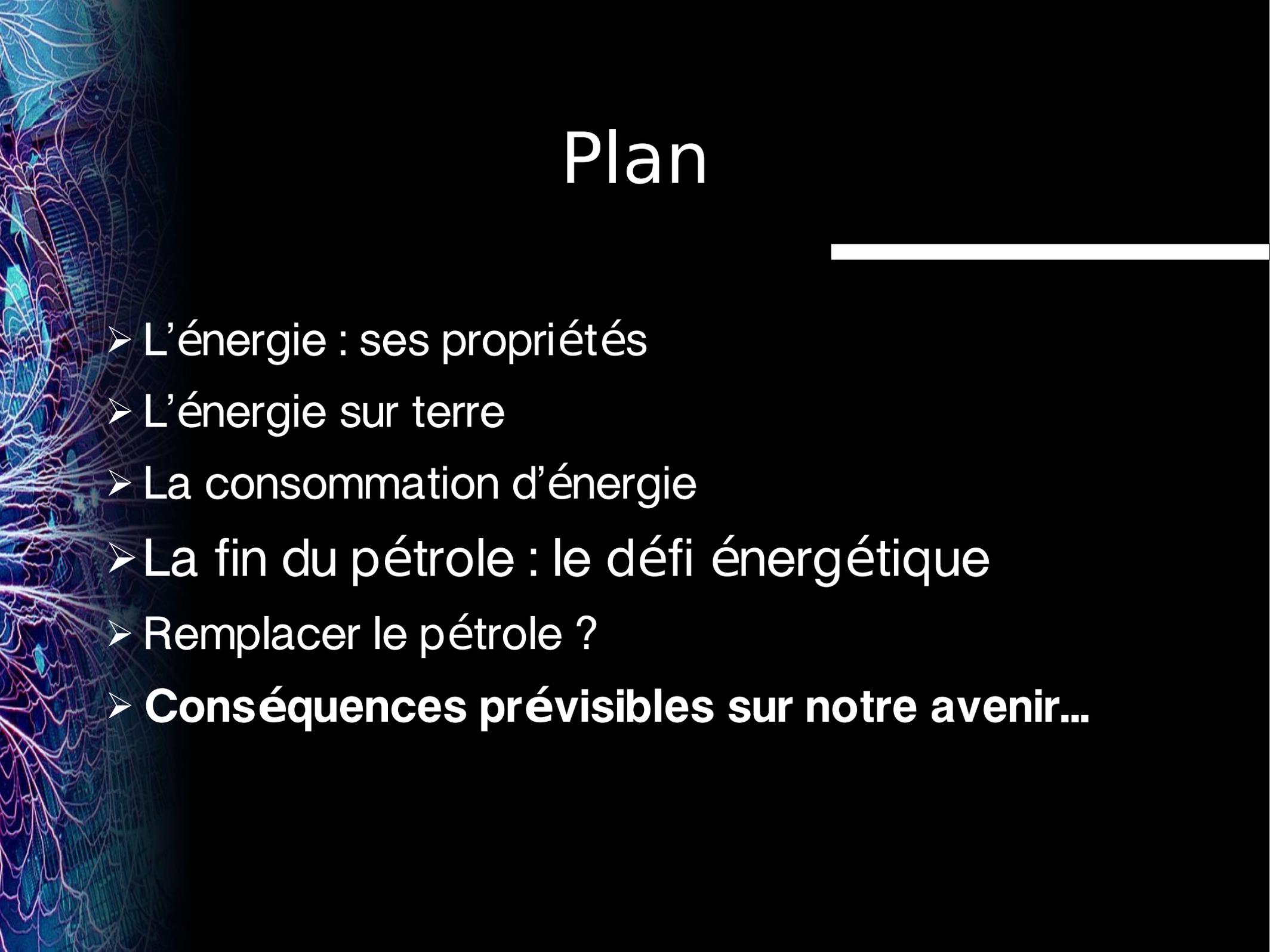
Note : Il y a 58 réacteurs en France.

# Conclusion

---

Avec deux fois plus de centrales nucléaires, tous les toits de France couverts de panneaux photovoltaïques et thermiques, des centaines de milliers d'éoliennes, des hydroliennes plein la mer, l'exploitation des forêts on n'arrivera pas à remplacer complètement le pétrole.

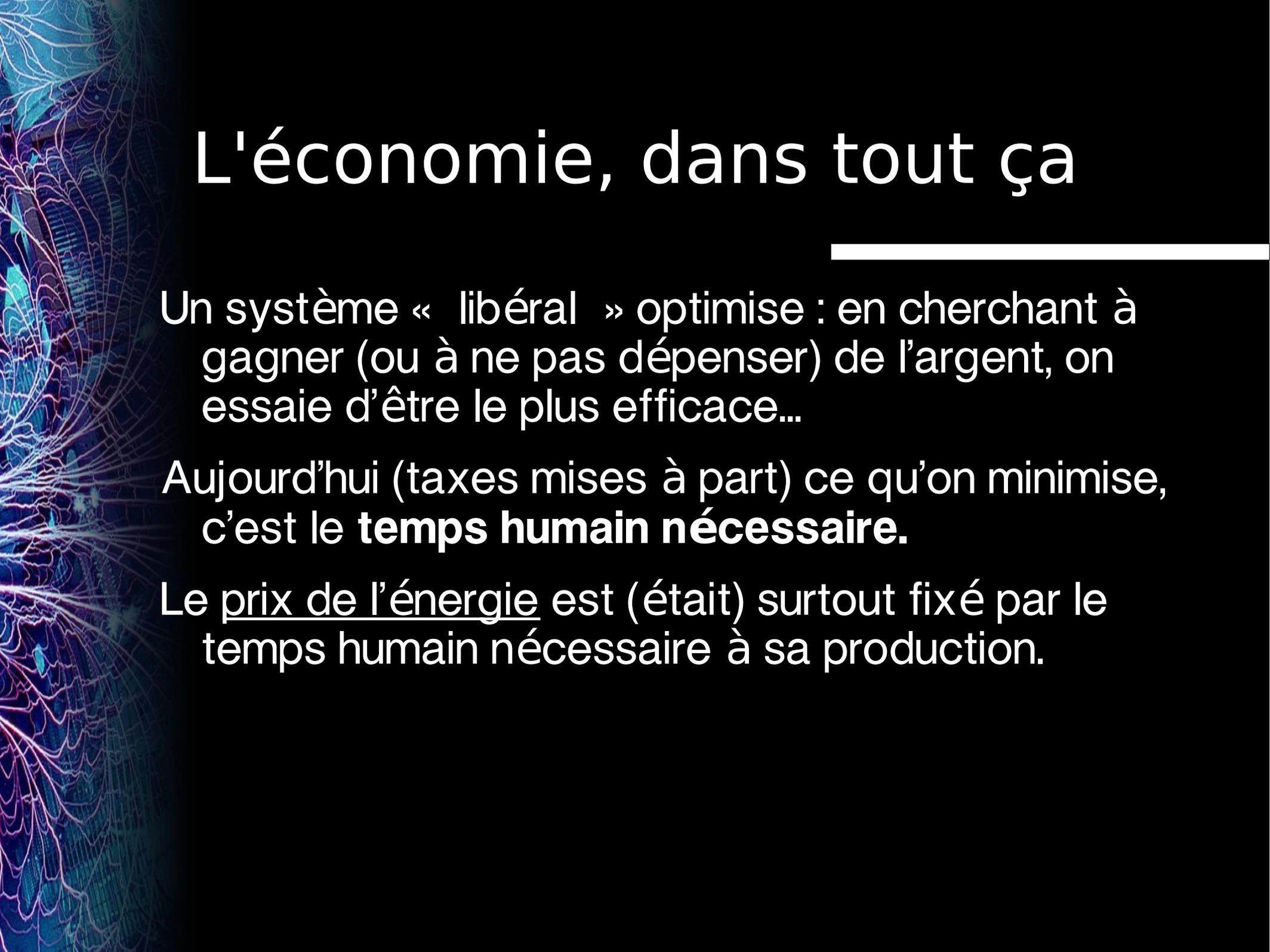
**Mais faire tout ça en dix ans ?**



# Plan

---

- L'énergie : ses propriétés
- L'énergie sur terre
- La consommation d'énergie
- La fin du pétrole : le défi énergétique
- Remplacer le pétrole ?
- **Conséquences prévisibles sur notre avenir...**



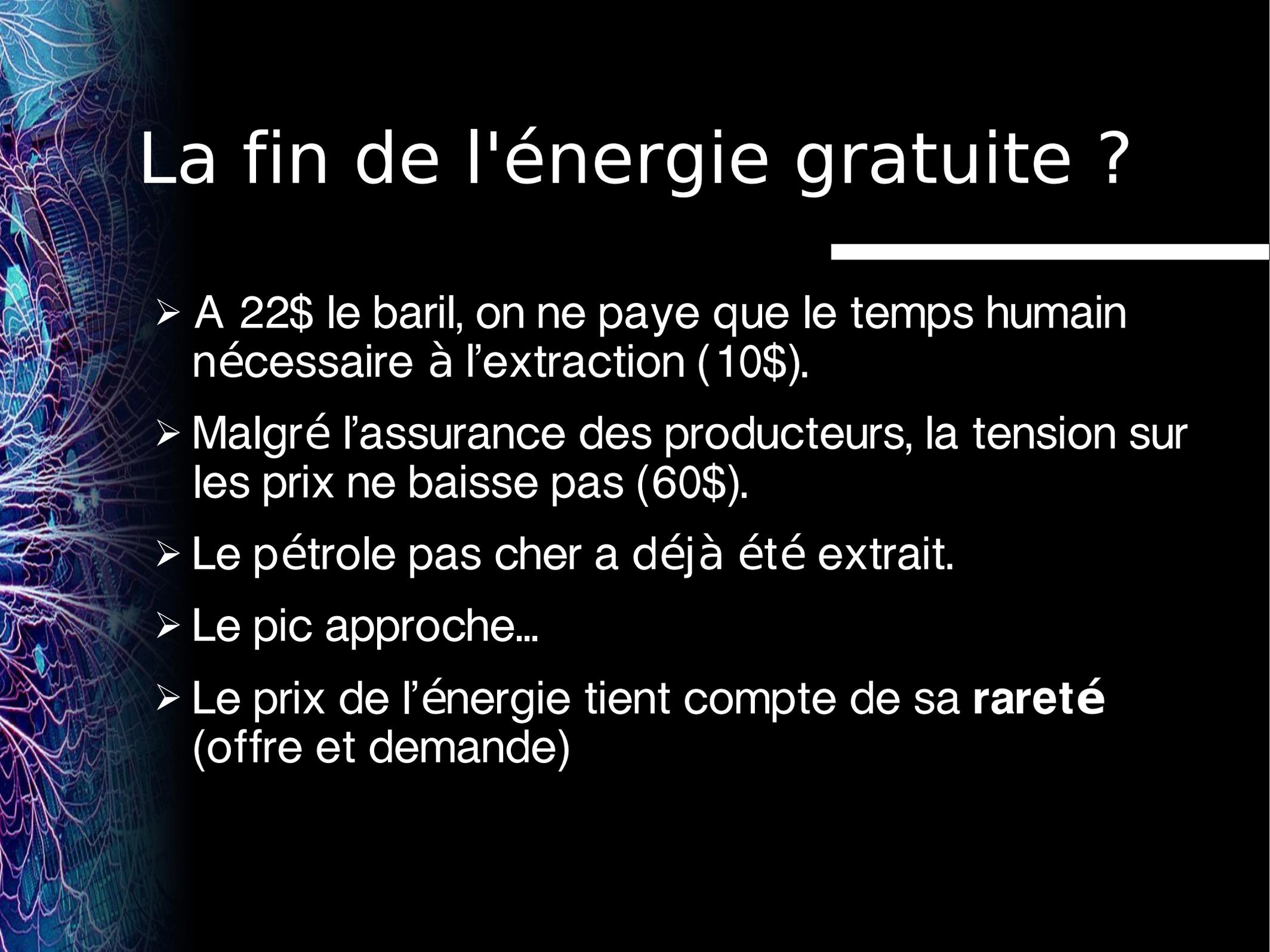
# L'économie, dans tout ça

---

Un système « libéral » optimise : en cherchant à gagner (ou à ne pas dépenser) de l'argent, on essaie d'être le plus efficace...

Aujourd'hui (taxes mises à part) ce qu'on minimise, c'est le **temps humain nécessaire**.

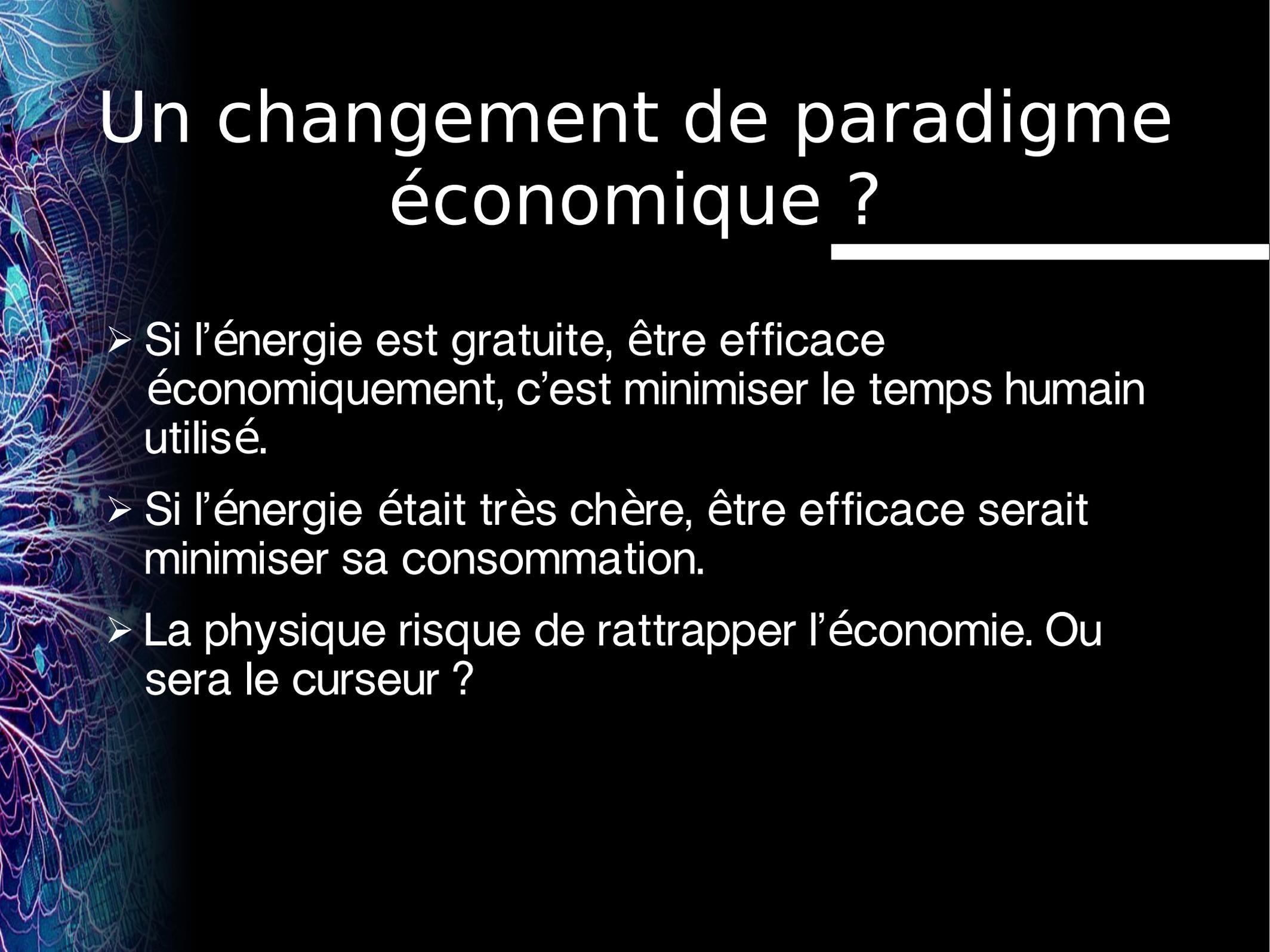
Le prix de l'énergie est (était) surtout fixé par le temps humain nécessaire à sa production.



# La fin de l'énergie gratuite ?

---

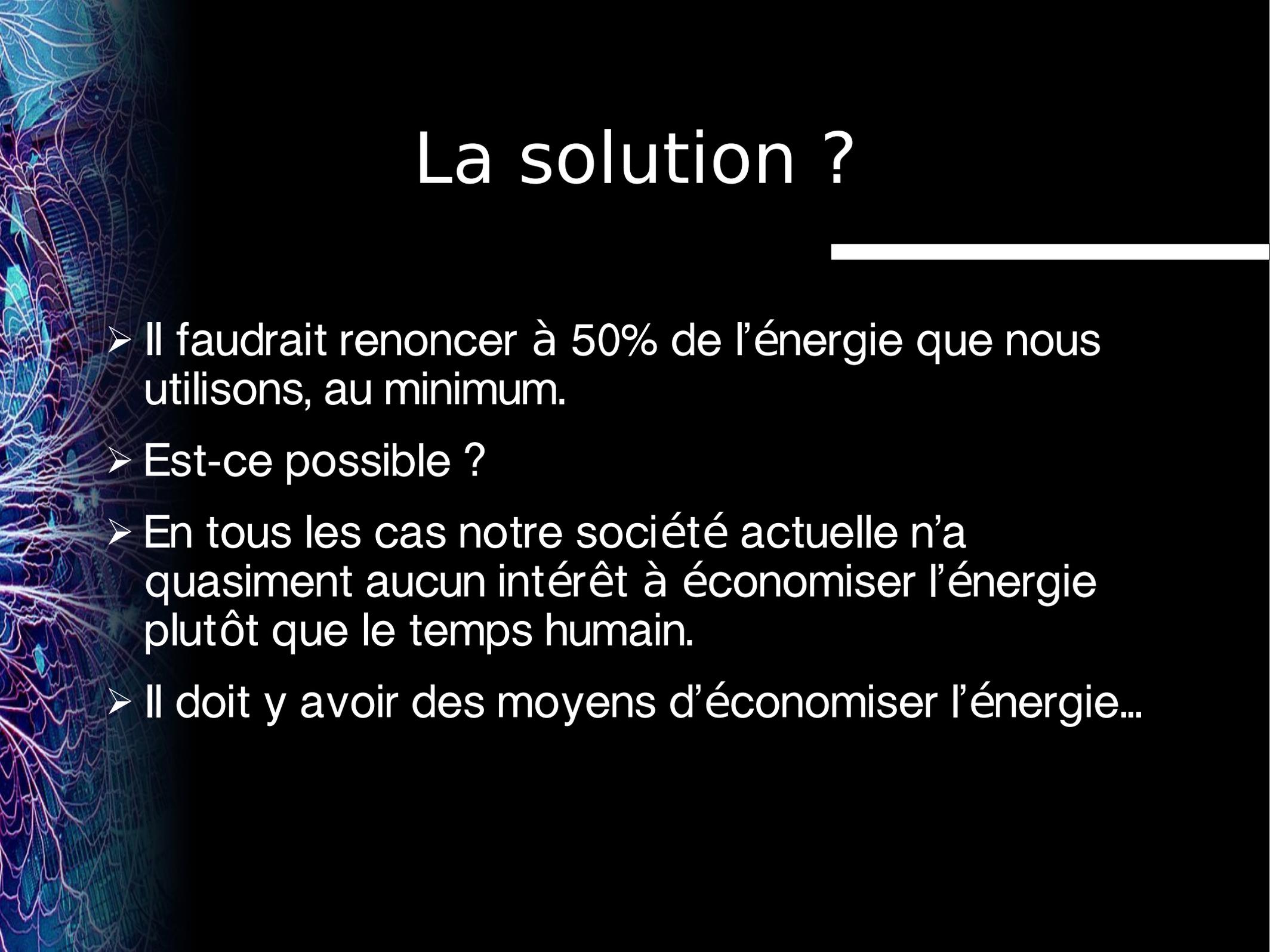
- A 22\$ le baril, on ne paye que le temps humain nécessaire à l'extraction (10\$).
- Malgré l'assurance des producteurs, la tension sur les prix ne baisse pas (60\$).
- Le pétrole pas cher a déjà été extrait.
- Le pic approche...
- Le prix de l'énergie tient compte de sa **rareté** (offre et demande)



# Un changement de paradigme économique ?

---

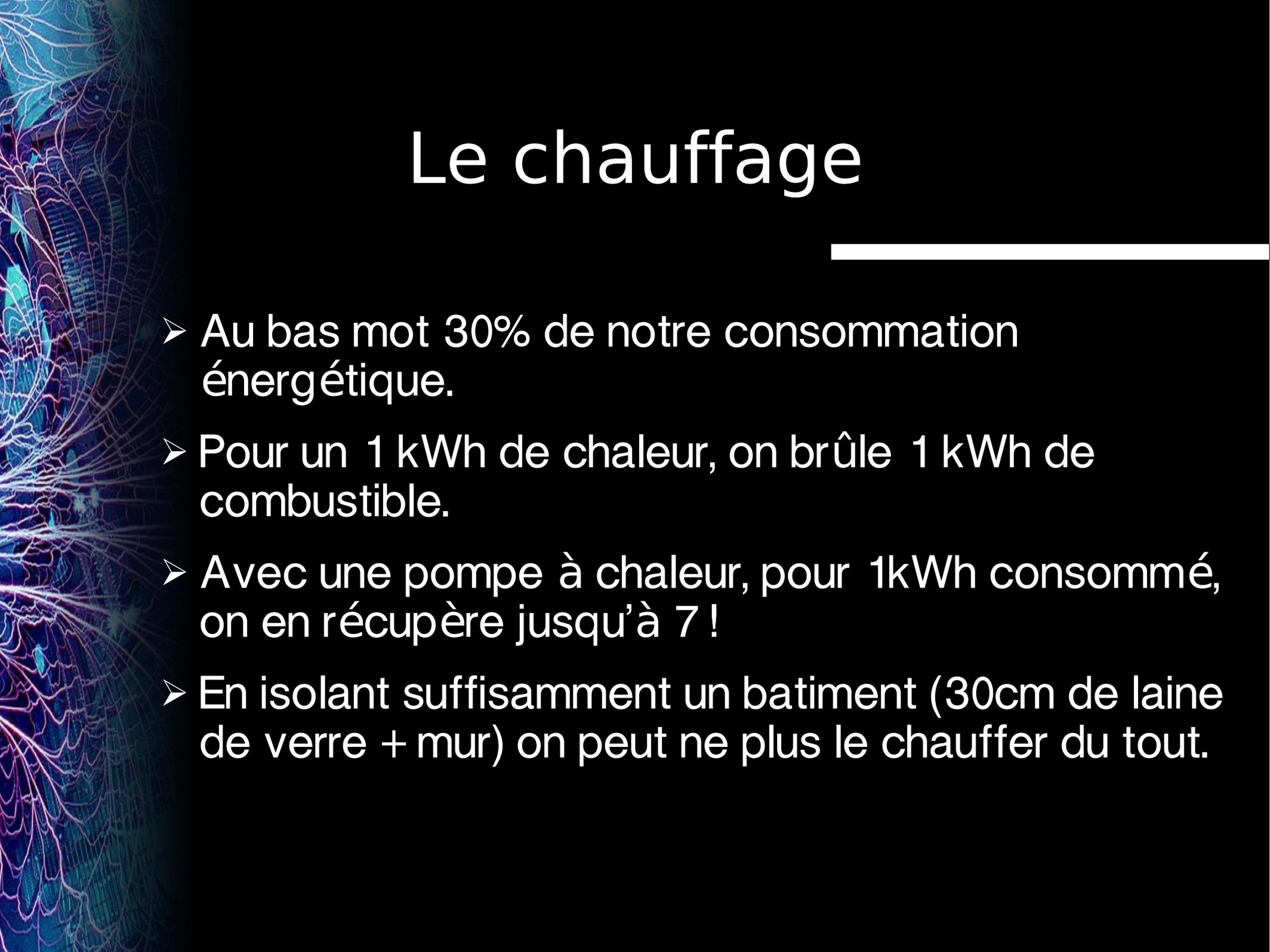
- Si l'énergie est gratuite, être efficace économiquement, c'est minimiser le temps humain utilisé.
- Si l'énergie était très chère, être efficace serait minimiser sa consommation.
- La physique risque de rattrapper l'économie. Ou sera le curseur ?



# La solution ?

---

- Il faudrait renoncer à 50% de l'énergie que nous utilisons, au minimum.
- Est-ce possible ?
- En tous les cas notre société actuelle n'a quasiment aucun intérêt à économiser l'énergie plutôt que le temps humain.
- Il doit y avoir des moyens d'économiser l'énergie...



# Le chauffage

---

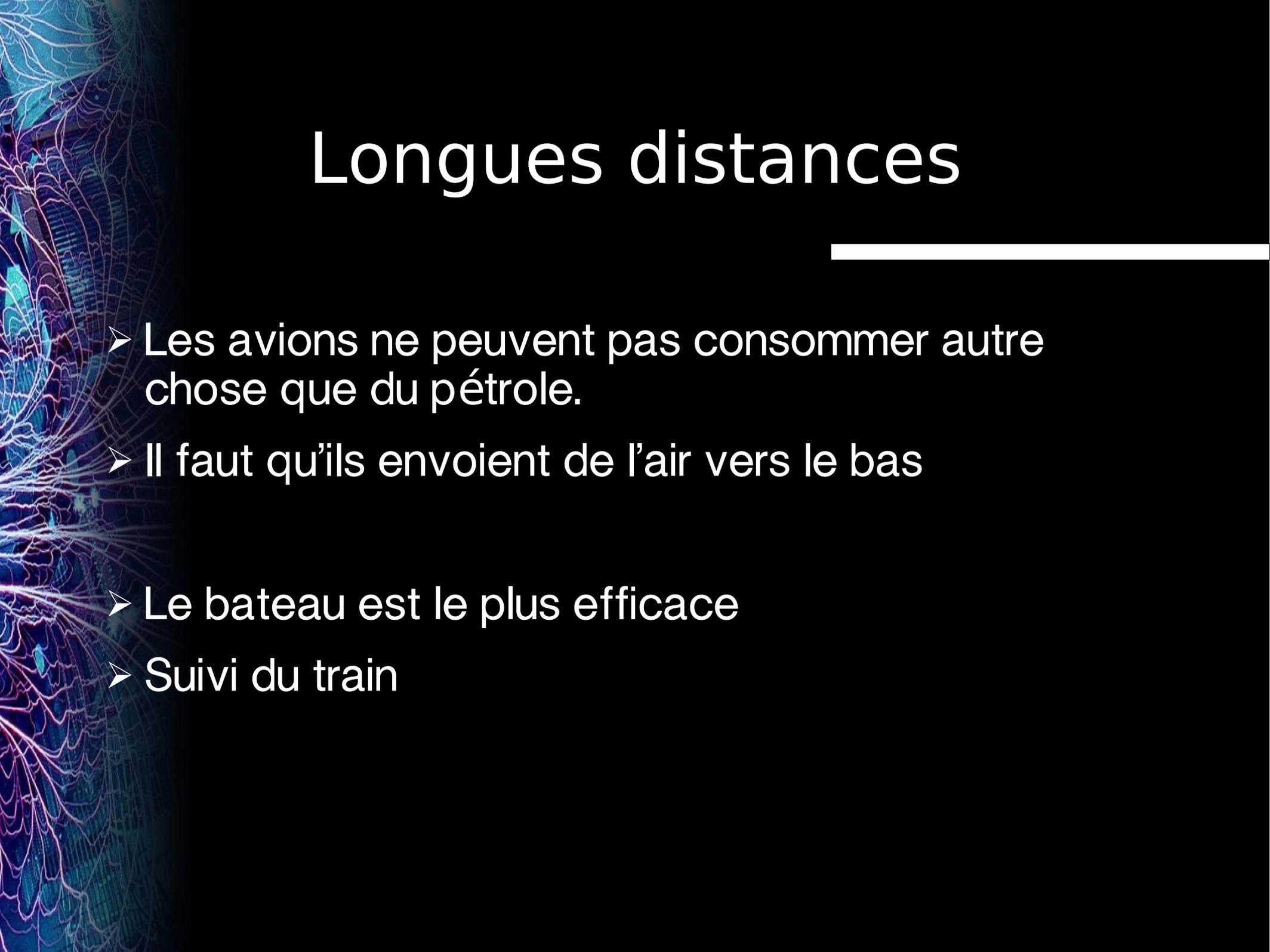
- Au bas mot 30% de notre consommation énergétique.
- Pour un 1 kWh de chaleur, on brûle 1 kWh de combustible.
- Avec une pompe à chaleur, pour 1kWh consommé, on en récupère jusqu'à 7 !
- En isolant suffisamment un bâtiment (30cm de laine de verre + mur) on peut ne plus le chauffer du tout.



# Les transports

---

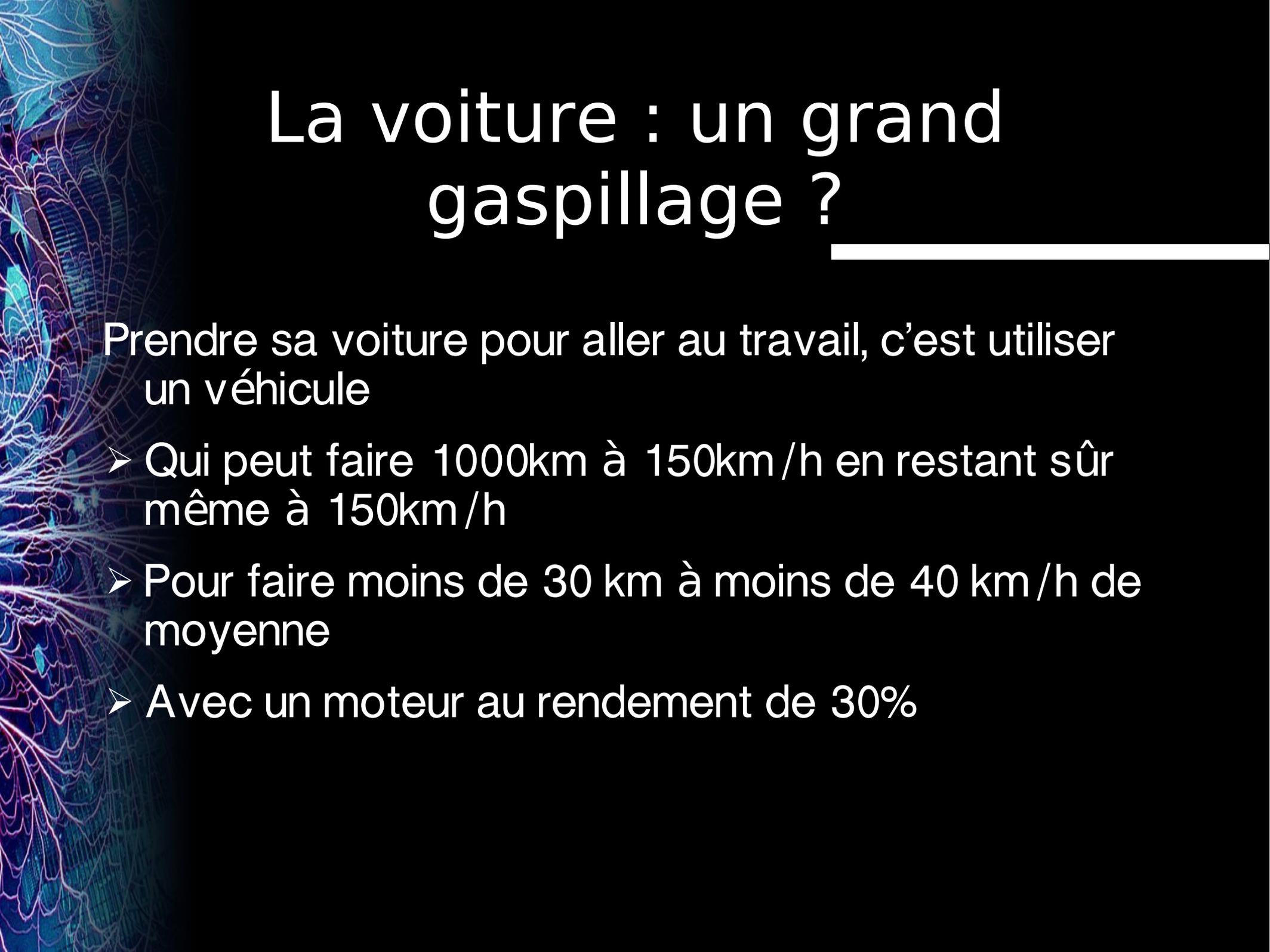
- Rien ne remplacera le pétrole : sa densité énergétique est trop grande.
- Les avions ne survivront pas à la fin du pétrole.
- Les voitures actuelles non plus.



# Longues distances

---

- Les avions ne peuvent pas consommer autre chose que du pétrole.
- Il faut qu'ils envoient de l'air vers le bas
- Le bateau est le plus efficace
- Suivi du train

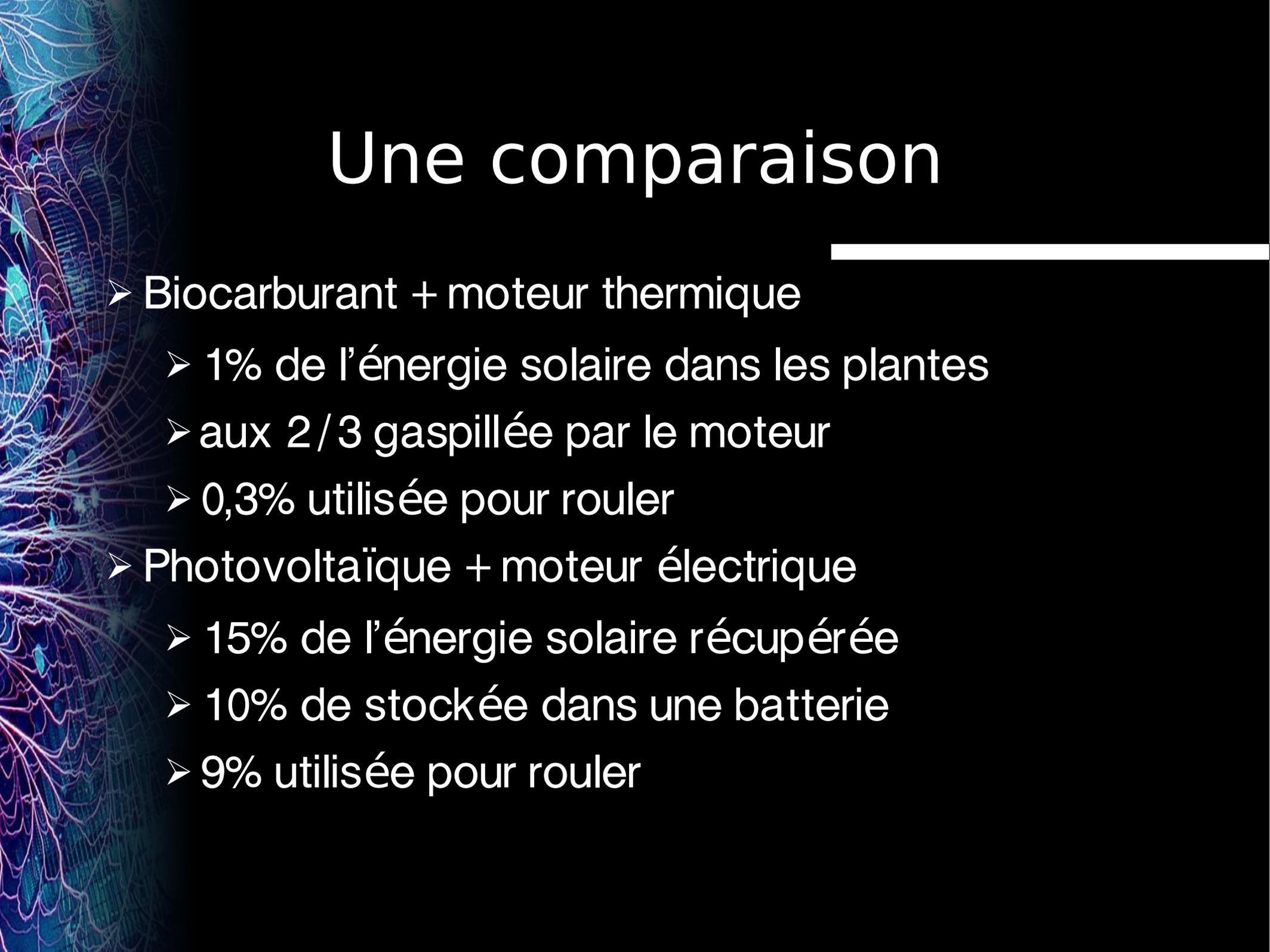


# La voiture : un grand gaspillage ?

---

Prendre sa voiture pour aller au travail, c'est utiliser un véhicule

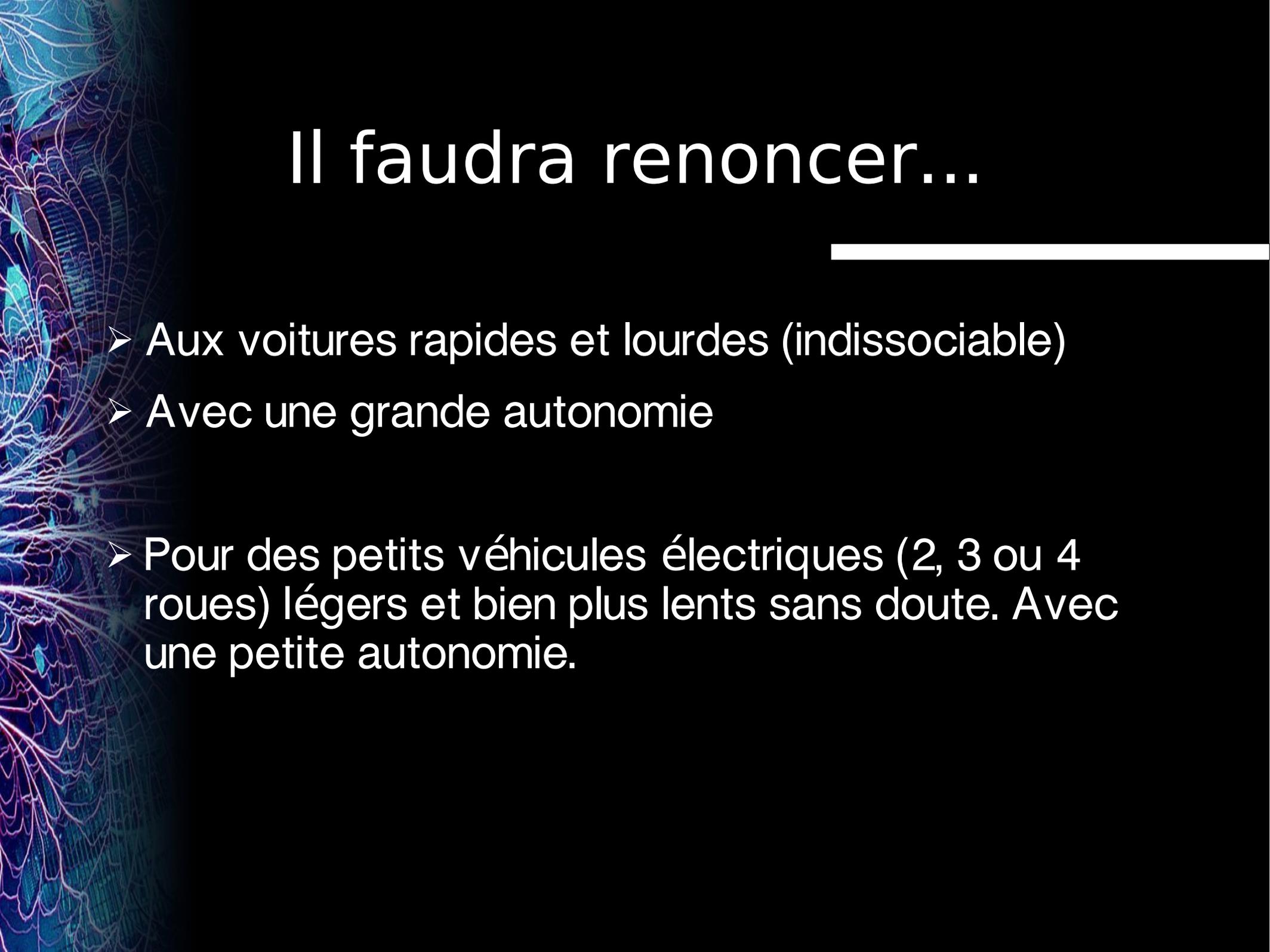
- Qui peut faire 1000km à 150km/h en restant sûr même à 150km/h
- Pour faire moins de 30 km à moins de 40 km/h de moyenne
- Avec un moteur au rendement de 30%



# Une comparaison

---

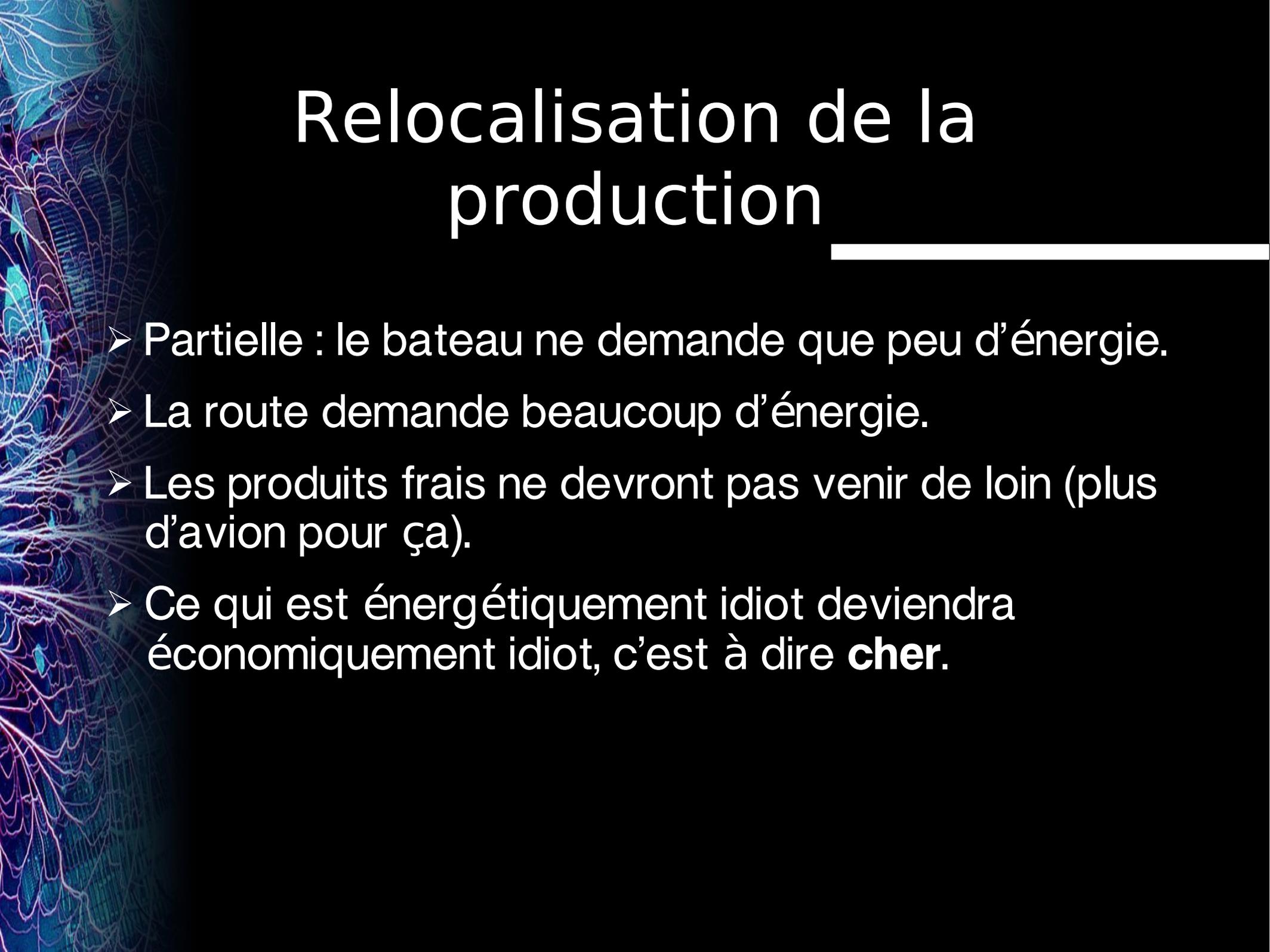
- Biocarburant + moteur thermique
  - 1% de l'énergie solaire dans les plantes
  - aux 2/3 gaspillée par le moteur
  - 0,3% utilisée pour rouler
- Photovoltaïque + moteur électrique
  - 15% de l'énergie solaire récupérée
  - 10% de stockée dans une batterie
  - 9% utilisée pour rouler



# Il faudra renoncer...

---

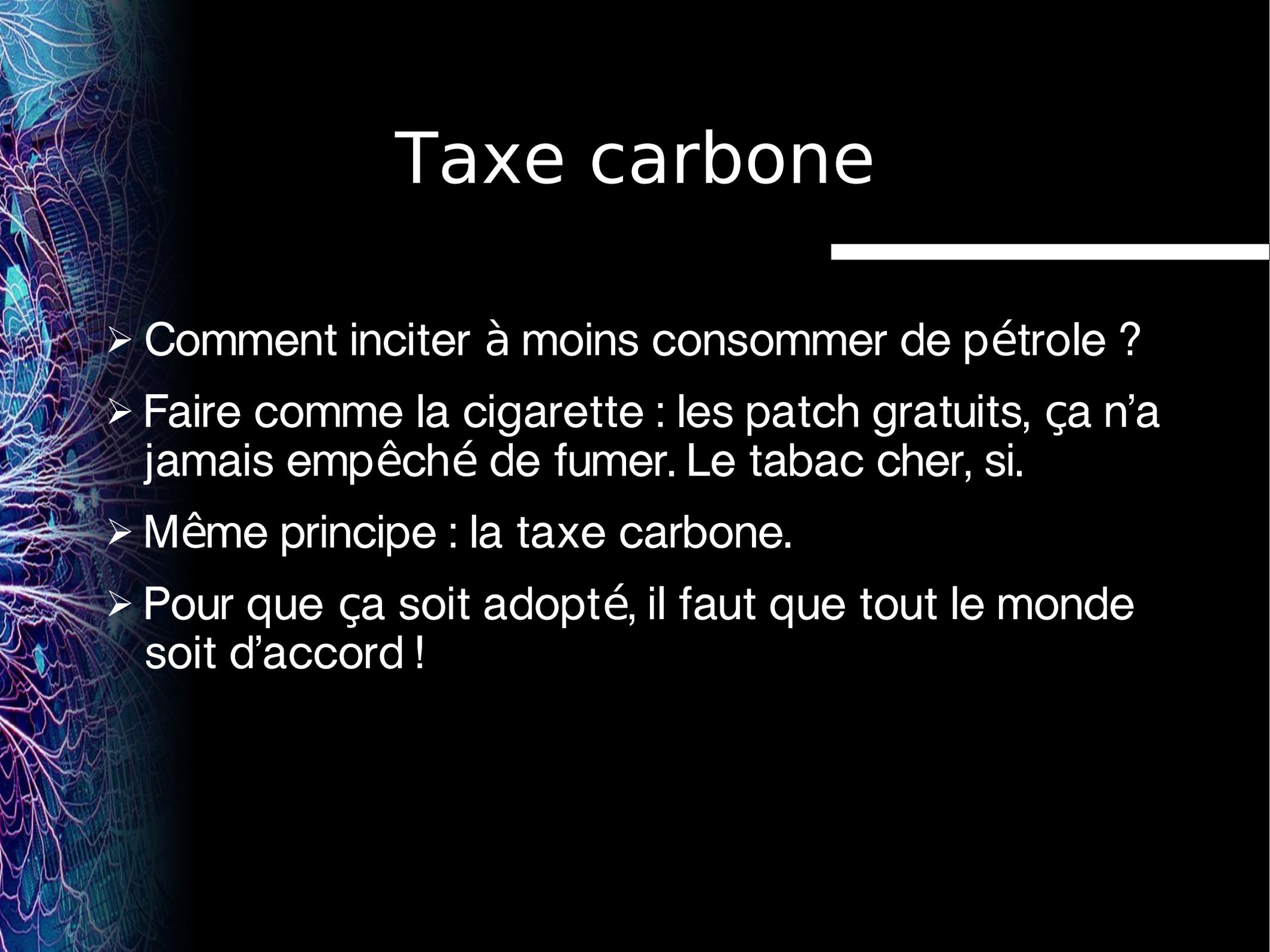
- Aux voitures rapides et lourdes (indissociable)
- Avec une grande autonomie
- Pour des petits véhicules électriques (2, 3 ou 4 roues) légers et bien plus lents sans doute. Avec une petite autonomie.



# Relocalisation de la production

---

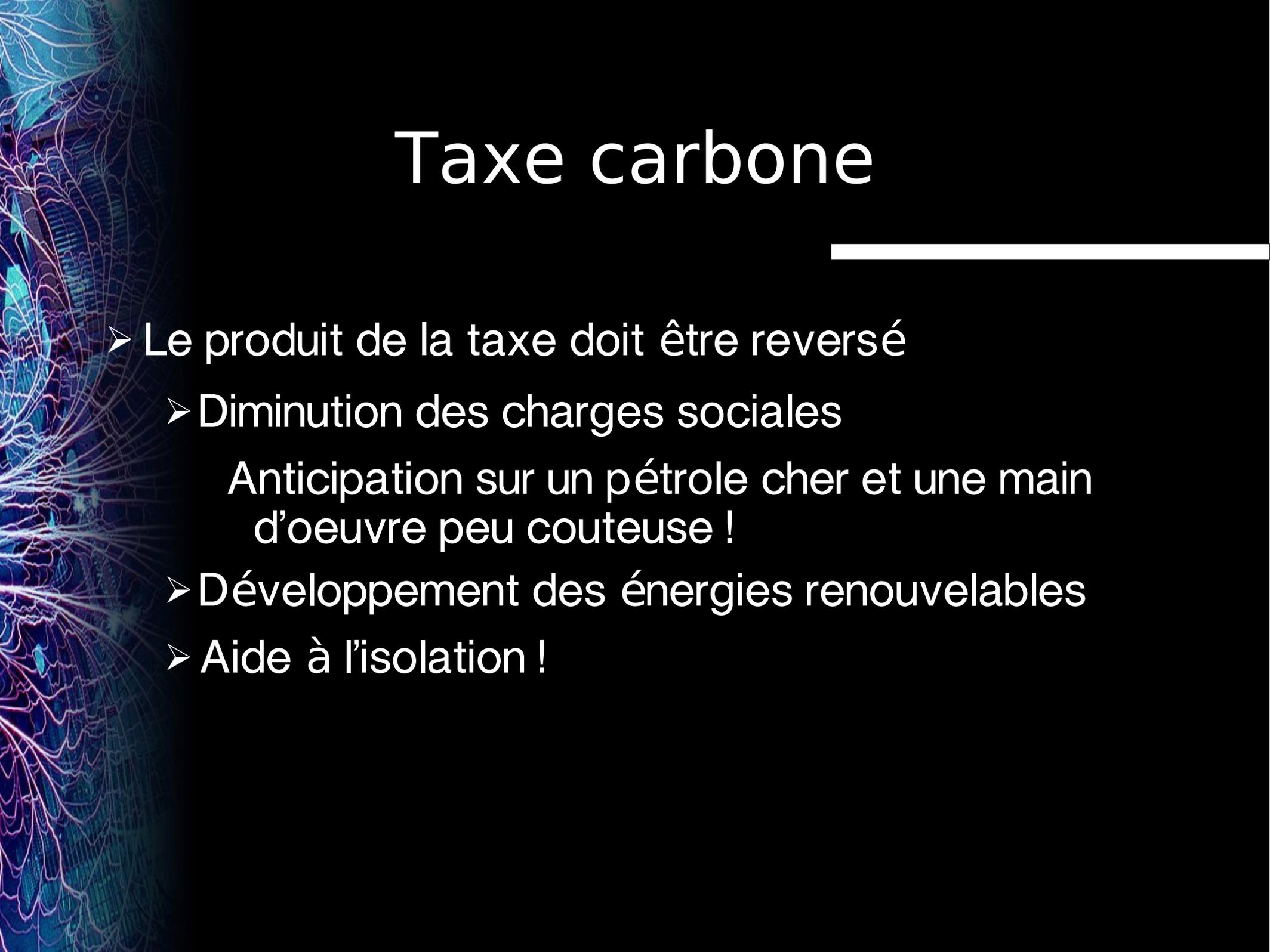
- Partielle : le bateau ne demande que peu d'énergie.
- La route demande beaucoup d'énergie.
- Les produits frais ne devront pas venir de loin (plus d'avion pour ça).
- Ce qui est énergétiquement idiot deviendra économiquement idiot, c'est à dire **cher**.



# Taxe carbone

---

- Comment inciter à moins consommer de pétrole ?
- Faire comme la cigarette : les patch gratuits, ça n'a jamais empêché de fumer. Le tabac cher, si.
- Même principe : la taxe carbone.
- Pour que ça soit adopté, il faut que tout le monde soit d'accord !



# Taxe carbone

---

- Le produit de la taxe doit être reversé
  - Diminution des charges sociales
    - Anticipation sur un pétrole cher et une main d'oeuvre peu couteuse !
  - Développement des énergies renouvelables
  - Aide à l'isolation !

# Conclusion

---

- La consommation énergétique va diminuer durablement, et ce sera **dur**.

Déjà fait (39-45), mais pas de manière durable.

- L'économie changera complètement

Il y aura des gagnants et des perdants. Pour l'instant, on n'entend que les perdants : ils sont déjà là. Les gagnants ne peuvent pas encore manifester pour la taxe carbone.

# Quelques idées reçues

---

- C'est un problème de source primaire d'énergie, pas de technique (Hydrogène, bactéries, aluminium)
- Acheter des ampoules basse consommation ne permettra pas de continuer à rouler en 4x4.
- Les principaux efforts sont pour notre pomme – l'industrie ne suffira pas.



# Quelques idées reçues

---

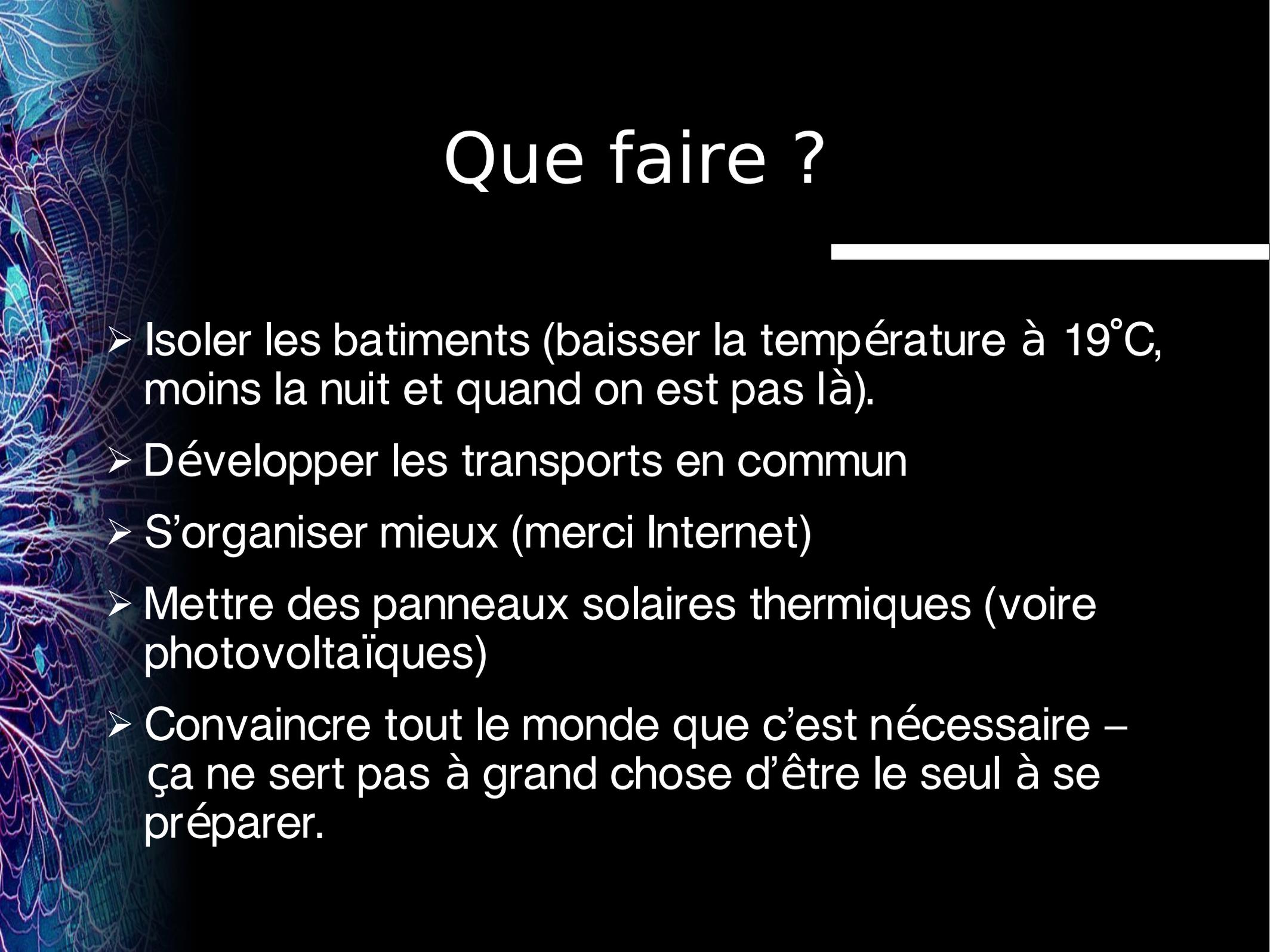
- On ne roulera pas avec les mêmes voitures (pas aussi vite, pas aussi lourdes).
- On ne prendra pas l'A380 pour passer un week-end à New-York.
- La recherche ne nous sauvera pas.  
Rien de réaliste dans les tuyaux.
- C'est pour dans **une dizaine d'années.**



# Beaucoup d'interrogations

---

- Notre économie aura-t'elle assez de temps pour s'adapter ?
- Arriverons nous à progresser (scientifiquement, culturellement, économiquement) sans progresser énergétiquement ?
- Pourrons nous conserver notre population et notre espérance de vie ?



# Que faire ?

---

- Isoler les batiments (baisser la température à 19°C, moins la nuit et quand on est pas là).
- Développer les transports en commun
- S'organiser mieux (merci Internet)
- Mettre des panneaux solaires thermiques (voire photovoltaïques)
- Convaincre tout le monde que c'est nécessaire – ça ne sert pas à grand chose d'être le seul à se préparer.