

Biophysique (2 heures)

Joaquín Bermejo Ortiz

I. Introduction à la biophysique

II. Peut-on comprendre la vie uniquement `a travers la physique ?

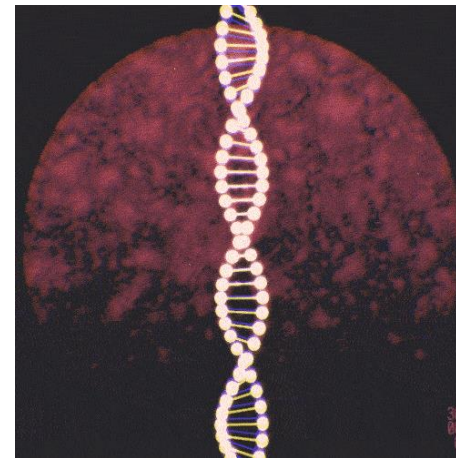
- Vitalisme VS mécanisme
- Notions d'incertitude, du chaos et du bruit thermique

III. De l' échelle moléculaire aux systèmes complexes

- Échelle moléculaire: moteurs moléculaires et nanomachines
- Échelle cellulaire: tissu nerveux et réseaux de neurones artificiels
- Échelle macroscopique: phénomènes collectifs et robotique en essaim

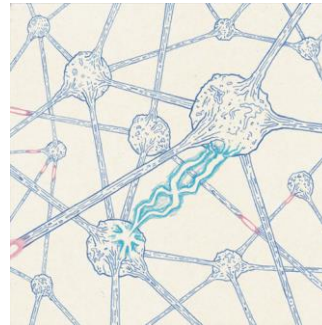
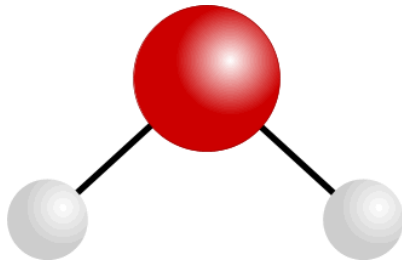
Biophysique : La science de la liaison

- La biophysique est le domaine qui applique les théories et les méthodes de la physique pour comprendre comment fonctionnent les systèmes biologiques.
- La biophysique a joué un rôle essentiel dans la compréhension des mécanismes de fabrication des molécules de la vie, du mouvement et du fonctionnement des différentes parties d'une cellule, ainsi que du fonctionnement des systèmes complexes de notre corps, tels que le cerveau, la circulation, le système immunitaire, et d'autres.
- La biophysique intègre les concepts de la physique, des mathématiques et de la chimie pour explorer une gamme variée de sujets, couvrant de l'échelle moléculaire jusqu'à l'échelle macroscopique.



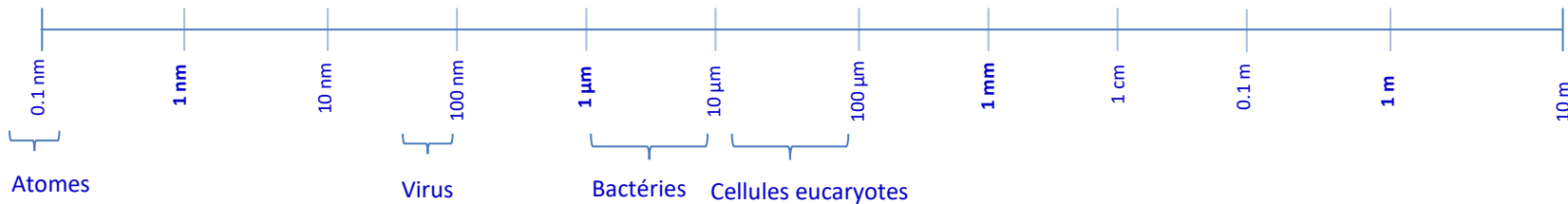
Biophysique : La science de la liaison

- La biophysique intègre les concepts de la physique, des mathématiques et de la chimie pour explorer une gamme variée de sujets, couvrant l'échelle moléculaire jusqu'à l'échelle macroscopique.
 1. Molécules
 2. Cellules
 3. Organismes et écosystèmes complexes



Physique quantique

Biophysique



Peut-on comprendre la vie uniquement à travers la physique ?

- Deux approches historiques pour expliquer la vie
 - **Vitalisme:** La vie ne peut pas être entièrement expliquée par les lois physiques connues. Il existe une *vis vitalis* (force vitale).
 - **Mécanicisme:** La vie peut être entièrement expliquée par les lois physiques connues. Il n'existe pas une *vis vitalis* (force vitale).
- Le mécanicisme est l'approche dominante en biologie moderne (pas de *vis vitalis*)
- Si les lois de la nature sont mécanistes, pourrait-on déterminer l'évolution de tout être vivant ?

Une intelligence qui, à un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la compose embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome ; rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux.

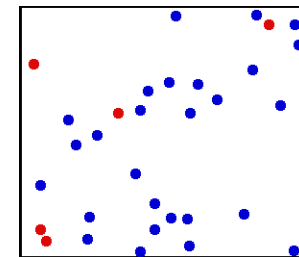
Pierre-Simon Laplace (1749-1827)

Si les lois de la nature sont mécanistes, pourrait-on déterminer l'évolution de tout être vivant ?

Une intelligence qui, à un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la compose embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome ; rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux.

Pierre-Simon Laplace (1749-1827)

- La réponse à cette question est complexe et fait l'objet de débats entre les scientifiques.
- Cependant, cette perspective mécaniciste a été remise en question en biologie en raison de trois notions:
 1. **L'incertitude**
 2. **Le chaos**
 3. **Le bruit thermique**



Si les lois de la nature sont mécanistes, pourrait-on déterminer l'évolution de tout être vivant ?

Une intelligence qui, à un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la compose embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome ; rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux.

Pierre-Simon Laplace (1749-1827)

1. L'incertitude

- En biologie, il existe une grande part d'incertitude due à la variabilité génétique, aux mutations aléatoires, aux interactions complexes entre les organismes, et à d'autres facteurs imprévisibles.
- L'incertitude limite la capacité à prévoir avec précision l'évolution du vivant.
- Ces éléments sont en partie analogues au concept d'incertitude en mécanique quantique (principe d'incertitude d'Heisenberg).



Si les lois de la nature sont mécanistes, pourrait-on déterminer l'évolution de tout être vivant ?

Une intelligence qui, à un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la compose embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome ; rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux.

Pierre-Simon Laplace (1749-1827)

2. Le chaos

- Le chaos est une propriété des systèmes dynamiques qui les rend imprévisibles à long terme.
- Les systèmes chaotiques sont **sensibles aux conditions initiales**, ce qui signifie que de petites variations dans les conditions initiales peuvent entraîner des résultats très différents.
- Le chaos est un phénomène universel, qui se retrouve dans de nombreux domaines, tels que la météorologie, la physique des fluides, la biologie, les finances, etc.
- Le chaos remet en question la vision déterministe du monde, selon laquelle l'avenir est entièrement déterminé par les conditions initiales.



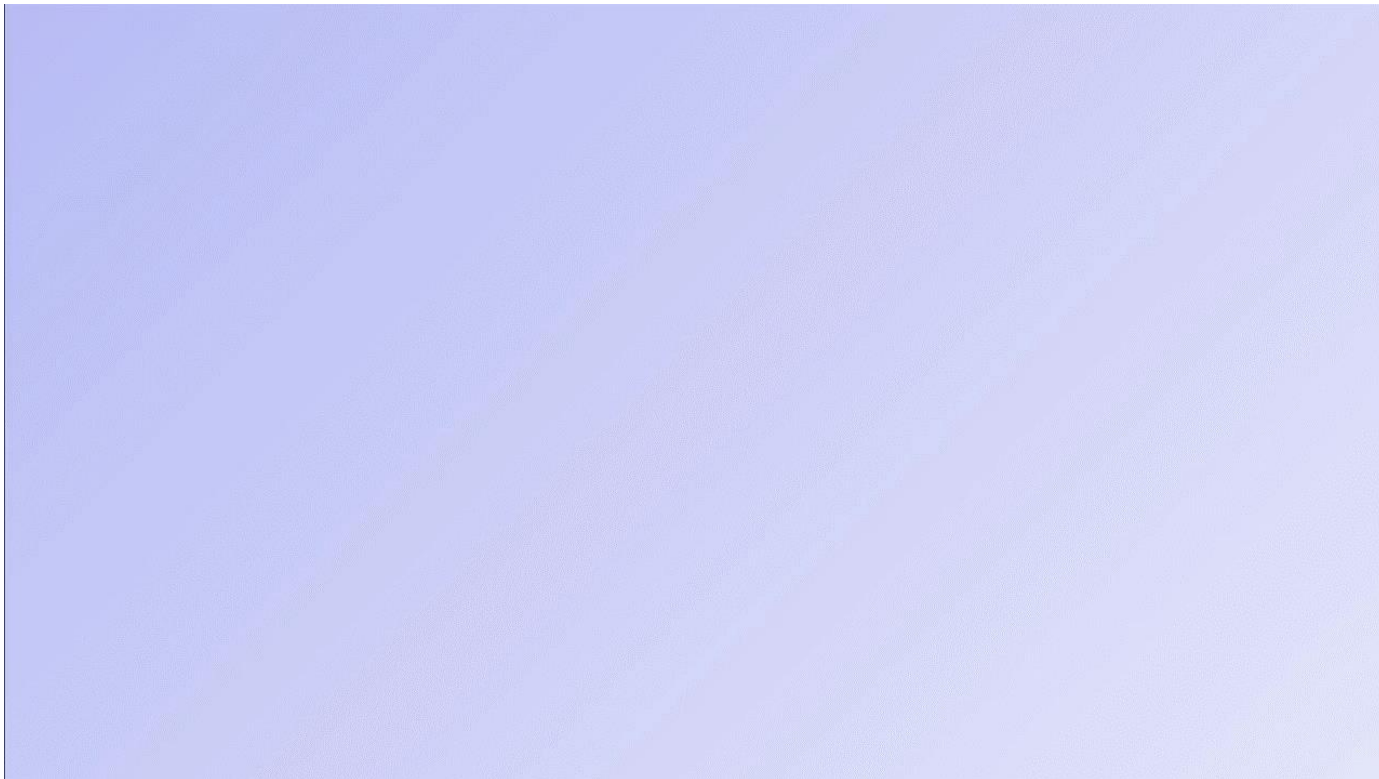
Le double pendule

Si les lois de la nature sont mécanistes, pourrait-on déterminer l'évolution de tout être vivant ?

Une intelligence qui, à un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la compose embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome ; rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux.

Pierre-Simon Laplace (1749-1827)

2. Le chaos



Le billard de Sinaï (Crédits: Automaths - Jason Lapeyronnie)

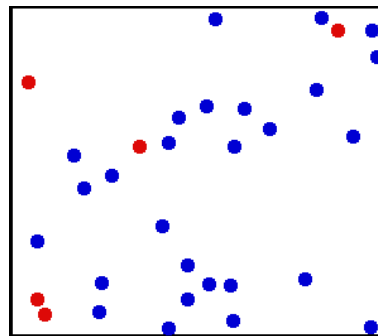
Si les lois de la nature sont mécanistes, pourrait-on déterminer l'évolution de tout être vivant ?

Une intelligence qui, à un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la compose embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome ; rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux.

Pierre-Simon Laplace (1749-1827)

3. Le bruit thermique

- Le bruit thermique est une agitation aléatoire des particules dans un système dû à leur énergie thermique.
- Il est présent à toutes les températures supérieures au zéro absolu (-273,15 °C).
- Le bruit thermique introduit une composante aléatoire dans le comportement des molécules et des cellules.
- Cela rend difficile, voire impossible, la mise en place d'un mécanisme parfait pour prédire l'évolution de tout être vivant.



Grains de pollen (rouge) en milieu gazeux (bleu)

Si les lois de la nature sont mécanistes, pourrait-on déterminer l'évolution de tout être vivant ?

Une intelligence qui, à un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la compose embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome ; rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux.

Pierre-Simon Laplace (1749-1827)

3. Le bruit thermique: le mouvement brownien

**Longueur Moyenne de diffusion
dans le mouvement brownien**

Si les lois de la nature sont mécanistes, pourrait-on déterminer l'évolution de tout être vivant ?

Une intelligence qui, à un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la compose embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome ; rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux.

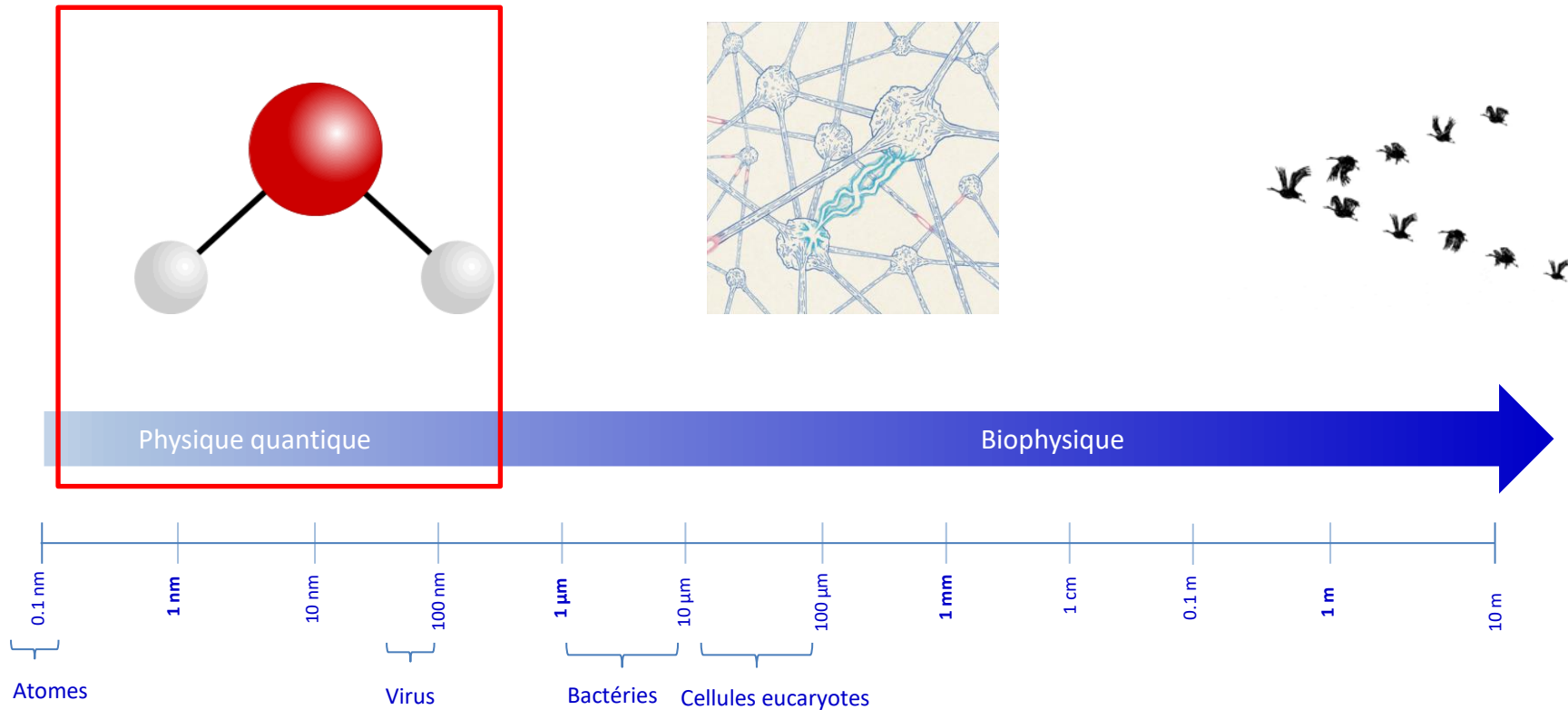
Pierre-Simon Laplace (1749-1827)

L'incertitude, le chaos et le bruit thermique difficile, voire impossible, la mise en place d'un mécanisme parfait pour prédire l'évolution de tout être vivant

Le premier arrêt: l'échelle moléculaire

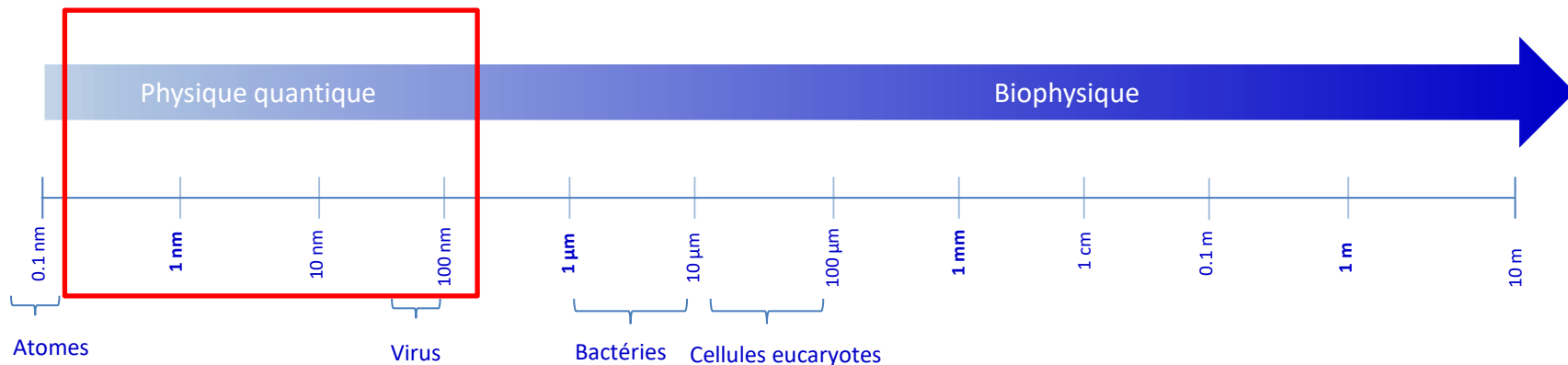
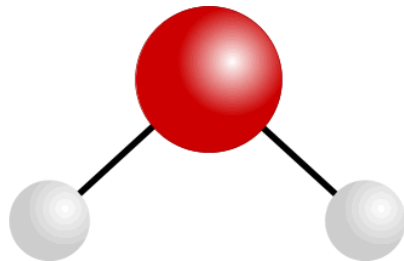
- La biophysique intègre les concepts de la physique, des mathématiques et de la chimie pour explorer une gamme variée de sujets, couvrant l'échelle moléculaire jusqu'à l'échelle macroscopique.

- Molécules**
- Cellules
- Organismes et écosystèmes complexes



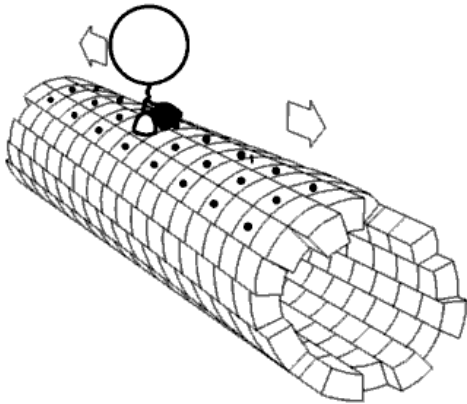
Moteurs moléculaires: qu'est-ce qu'une molécule?

- Une molécule est une entité chimique constituée d'au moins deux atomes liés ensemble par des liaisons chimiques.
- Les atomes qui composent une molécule peuvent être du même élément chimique ou de différents éléments chimiques.
- Les atomes partagent des électrons pour atteindre une configuration électronique stable et ainsi l'état d'énergie minimale.

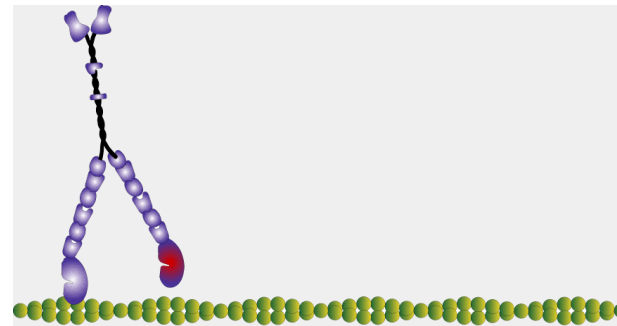


Moteurs moléculaires

- Les moteurs moléculaires sont des objets de la taille d'une molécule ou d'un assemblage de molécules capables de convertir l'énergie chimique en mouvement mécanique
- Ils sont essentiels à de nombreux processus cellulaires, tels que le transport intracellulaire, la division cellulaire et la réplication de l'ADN
- Les différences les plus importantes par rapport aux moteurs macroscopiques concernent la sensibilité des moteurs moléculaires à la viscosité de leur micro-environnement, et surtout à l'importance de l'agitation thermique.



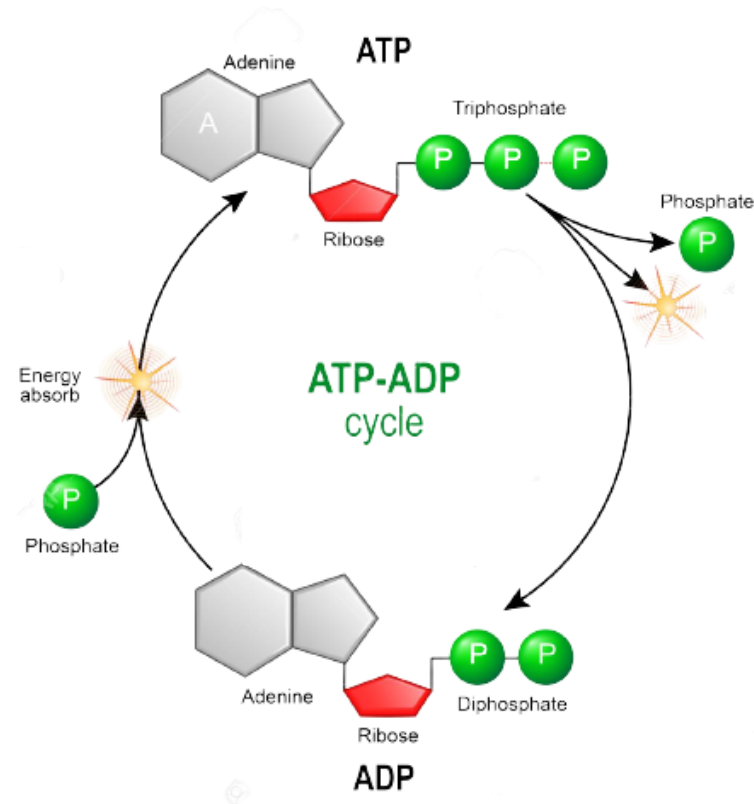
Molécule de kinésine attachée à un microtubule



Déplacement de la myosine V (crédit: physioweb.uvm.edu)

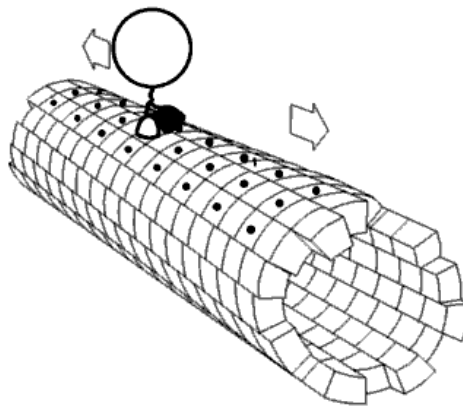
Moteurs moléculaires

- La plupart des moteurs moléculaires fonctionnent en suivant un cycle chimique. Ils utilisent une source d'énergie, généralement l'ATP (adénosine triphosphate), pour effectuer un travail mécanique. Ce cycle chimique est composé de plusieurs étapes, notamment la liaison de l'ATP, l'hydrolyse de l'ATP en ADP (adénosine diphosphate) et en phosphate inorganique, la libération du phosphate inorganique, et enfin la libération de l'ADP.

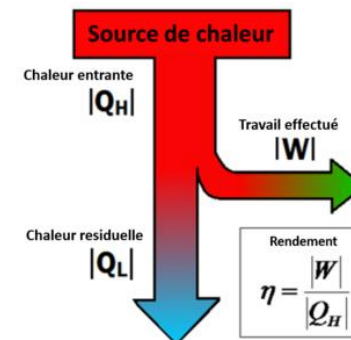


La kinésine: une mise en perspective de sa prouesse

- La taille: imaginez un petit bonhomme d'1m80. S'il était équipé de pieds à l'échelle de la kinésine, il chauserait du 56.
- La vitesse de déplacement: La kinésine parcourt en moyenne $1 \mu\text{m}$ (soit 10^{-6} m) par seconde. Cette vitesse lui permet de traverser une cellule en une dizaine de secondes. À ce rythme, un humain avec une foulée d'1 mètre de long pourrait courir à la vitesse impressionnante de 366 km/h.
- Sa force de traction: Une kinésine peut transporter une charge jusqu'à 100 fois son propre poids moléculaire.
- Son efficacité: Le rendement d'un moteur moléculaire est bien supérieure à celui d'un moteur macroscopique. Les moteurs moléculaires peuvent atteindre des efficacités de 90 %, tandis que les macroscopiques ont généralement des efficacités de seulement 30 %



Molécule de kinésine attachée à un microtubule



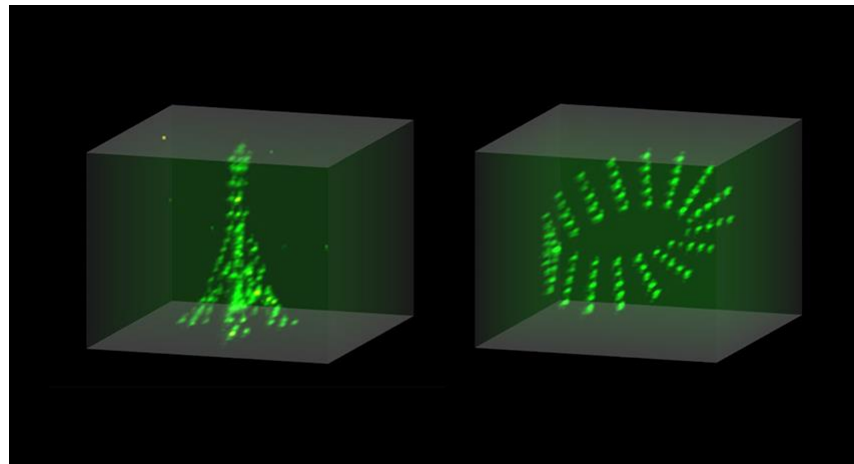
La kinésine: une mise en perspective de sa prouesse



Les machines moléculaires (Crédits: <http://raisonne.fr/>)

L'homme imite la nature: les nanomoteurs artificiels

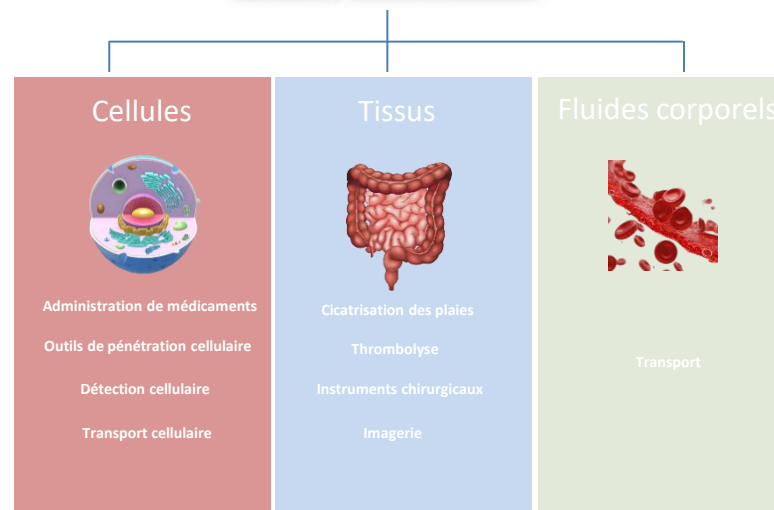
- Inspiré par l'haute performance des moteurs moléculaires, les ingénieurs ont voulu les imiter, donnant naissance à ce que l'on appelle les nanomoteurs ou les nanomachines.
- Dans cet esprit, en 1959, le physicien visionnaire Richard Feynman a prononcé une conférence historique intitulée "*There's Plenty of Room at the Bottom*" (Il y a beaucoup de place en bas).
- Feynman a argumenté qu'il serait possible de manipuler les atomes et les molécules individuellement, ouvrant de nouvelles opportunités pour la construction de dispositifs et de systèmes à une échelle infinitésimale. Il a affirmé qu'il "n'y a rien qui l'empêche", tant que nous pouvons "réparer une chose, atome par atome".



Des scientifiques ont disposé des atomes de rubidium en structures 3D, telles que la tour Eiffel et une bande de Möbius (*Nature* 561, 79–82 (2018))

L'homme imite la nature: les nanomoteurs artificiels

- On peut imaginer des machines artificielles à l'échelle atomique et moléculaire
- Quelques applications: livraison de médicaments à des points spécifiques dans le corps, nettoyage de contaminants au niveau moléculaire, reconstruction de tissus vivants sans chirurgie invasive, thérapie contre le cancer...
- Quelques problèmes éthiques: Les nanomachines peuvent passer totalement inaperçues, nécessité de réglementations strictes...



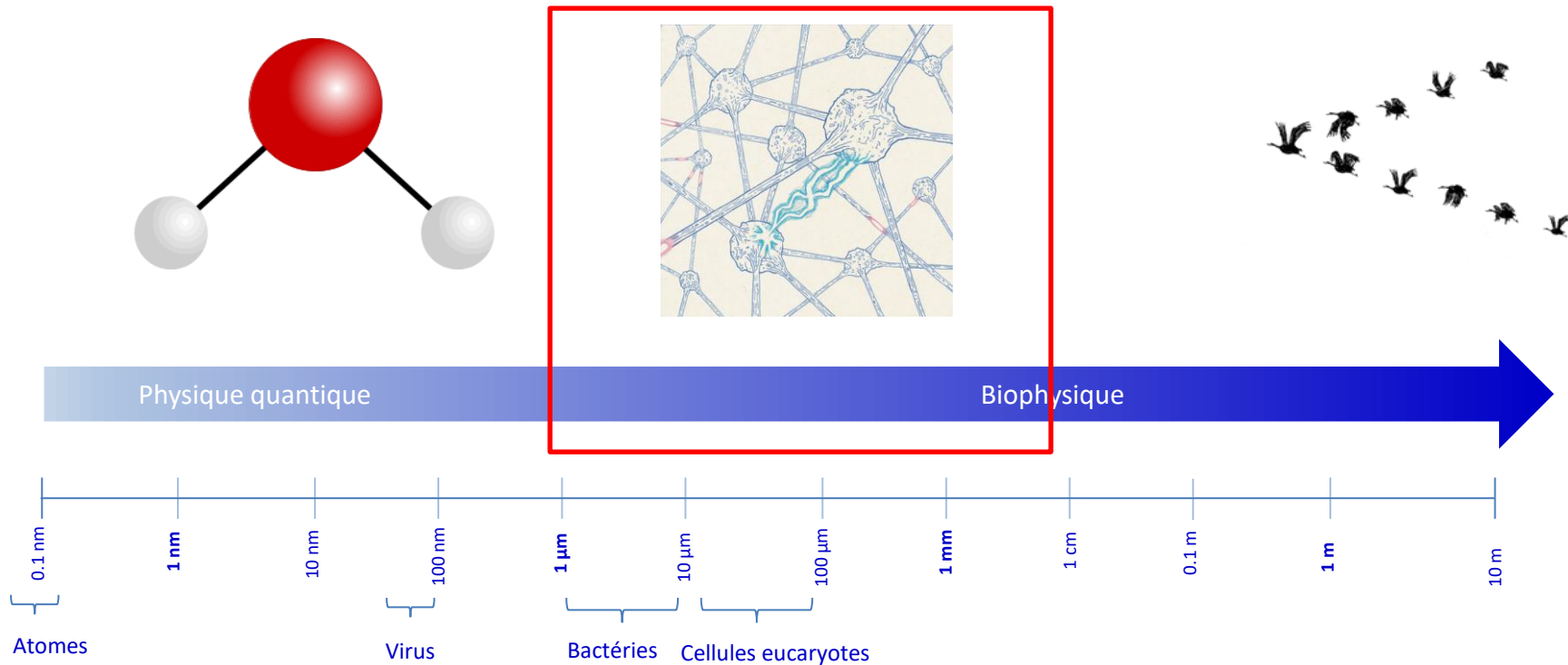
Idée pour exposée I:

- Si toute idée de l'homme est inspirée d'un objet de la nature, ou un organisme vivant, pour quoi l'homme a inventé les roues malgré le fait qu'il n'y a pas d'organismes dotés de roues dans la nature ?
- Autrement dit, si la roue est une méthode de transport extrêmement efficace chez l'homme, pourquoi n'existe-t-il pas d'équivalent évolutif dans la nature ?



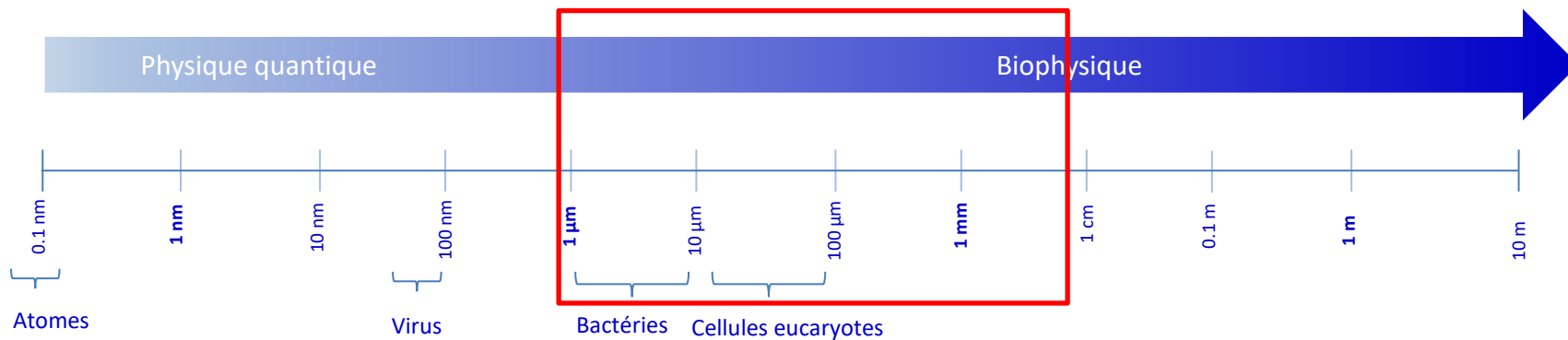
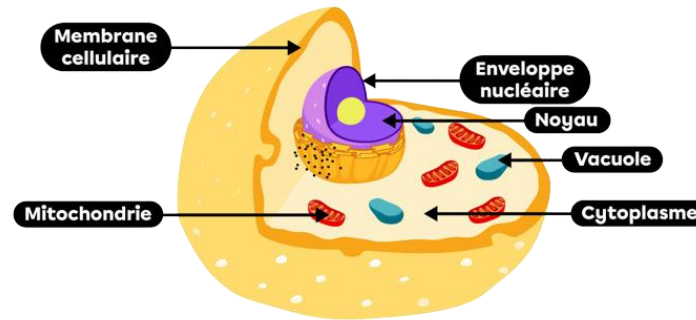
Le deuxième arrêt: l'échelle cellulaire

- La biophysique intègre les concepts de la physique, des mathématiques et de la chimie pour explorer une gamme variée de sujets, couvrant l'échelle moléculaire jusqu'à l'échelle macroscopique.
 1. Molécules
 2. Cellules
 3. Organismes et écosystèmes complexes



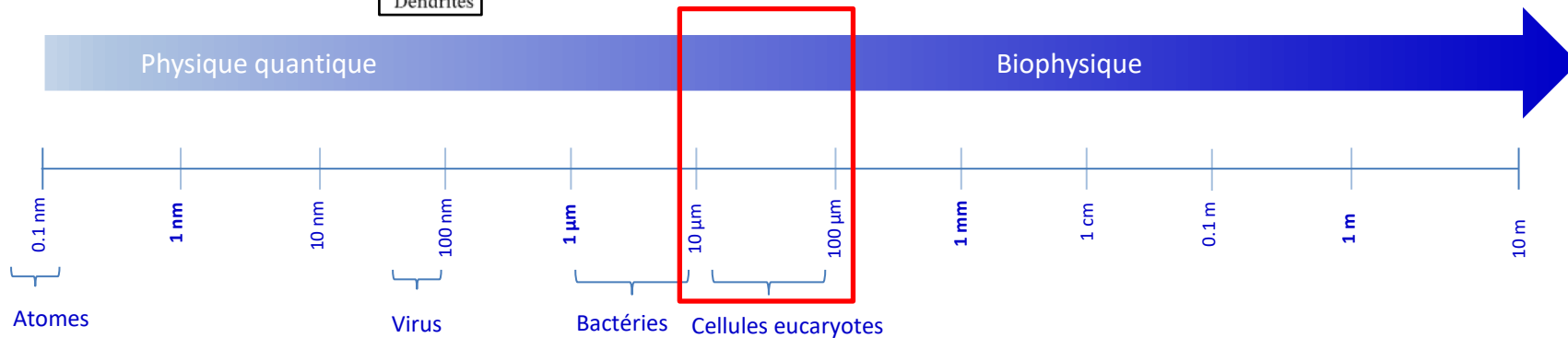
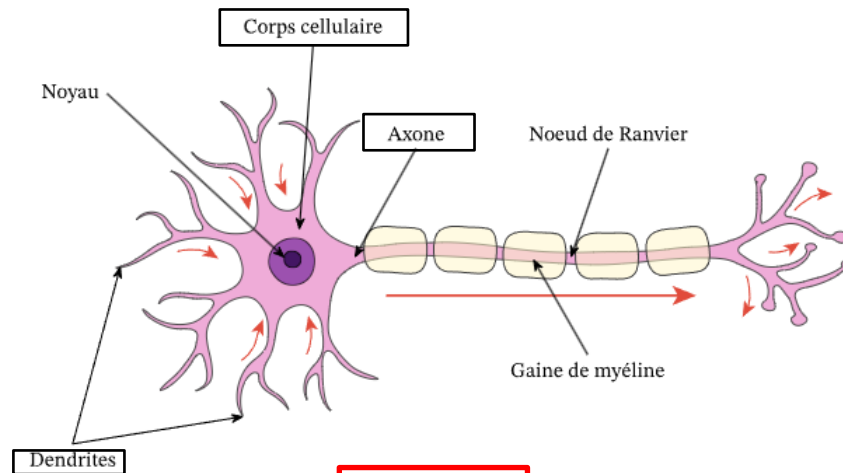
La cellule : l'unité de la vie

- La cellule est l'unité structurelle et fonctionnelle du vivant.
- Elles remplissent un large éventail de fonctions (la croissance, la reproduction, la réparation, la communication...)
- Les cellules sont constituées de trois parties principales : la membrane cellulaire, le cytoplasme et le noyau.



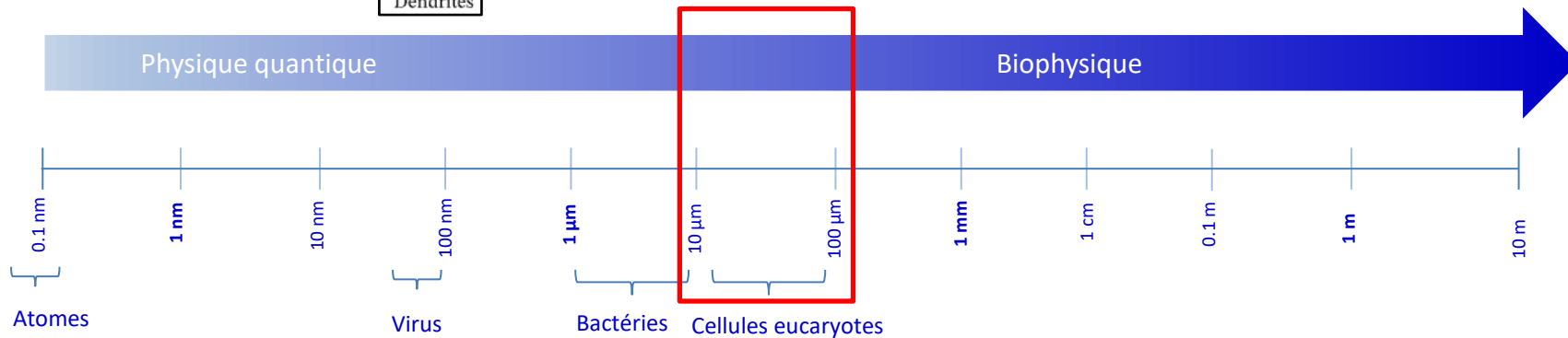
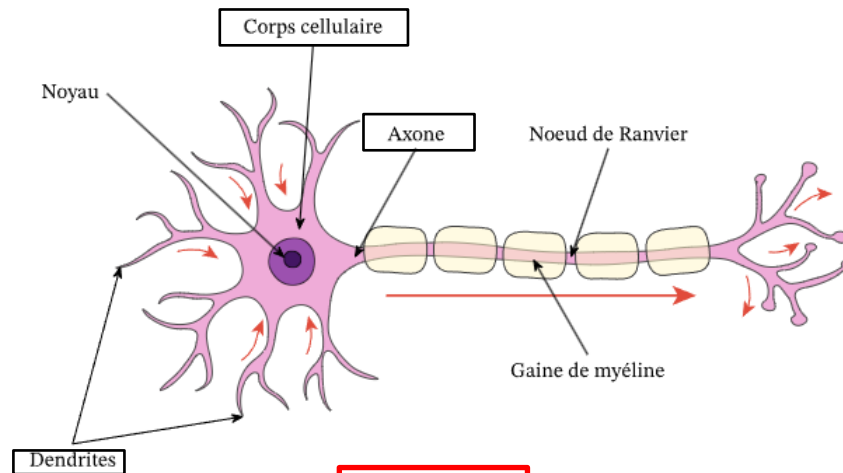
Les neurones

- Les cellules nerveuses, ou neurones, sont les unités fonctionnelles du système nerveux.
- Elles sont responsables de la transmission des informations au sein de l'organisme.
- Les cellules nerveuses sont constituées d'un corps cellulaire, d'un axone et de dendrites.



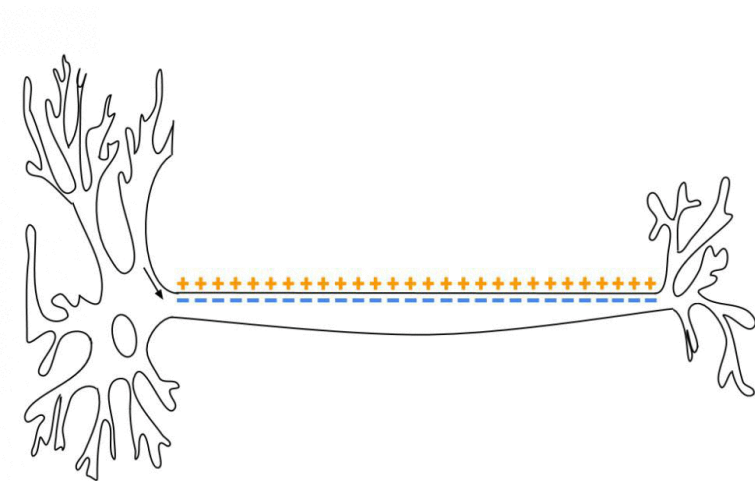
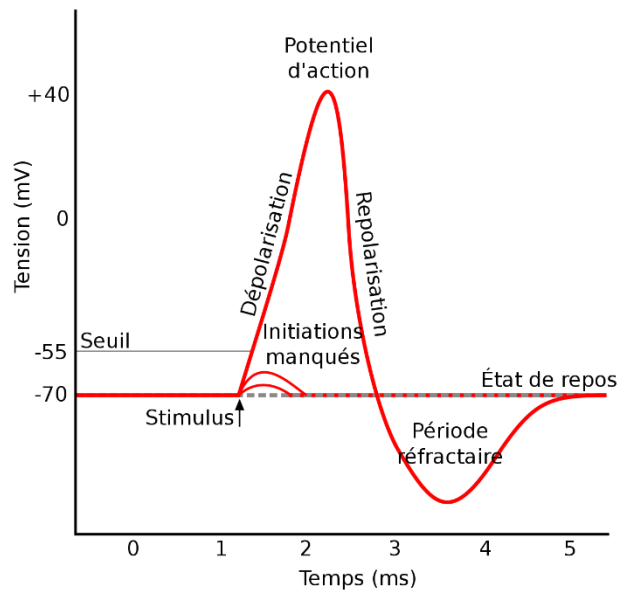
Les neurones

- Le corps cellulaire contient le noyau et la plupart des organites cellulaires.
- Les dendrites sont des prolongements fins qui reçoivent les signaux des autres neurones.
- L'axone est un prolongement long et mince qui transmet les signaux aux autres neurones.



Les neurones: Le potentiel d'action et la synapse

- Les neurones sont des cellules excitables: elles peuvent générer des impulsions électriques appelées potentiels d'action.
- Les potentiels d'action sont transmis d'un neurone à l'autre par des synapses.
- Les potentiel d'actions et les synapses ont été expérimentalement observé grâce à l'électrophysiologie



Les neurones: un approche historique

- En 1850 Hermann von Helmholtz observe expérimentalement les potentiels d'action en mesurant la vitesse de l'influx nerveux (~ 25 m/s).



Les neurones: un approche historique

- En 1850 Hermann von Helmholtz observe expérimentalement les potentiels d'action en mesurant la vitesse de l'influx nerveux (~ 25 m/s).
- Santiago Ramón y Cajal a observé les cellules nerveuses par une technique de coloration cellulaire (prix Nobel de physiologie ou médecine en 1906 « *en reconnaissance de leurs travaux sur la structure du système nerveux* »).



Cellules de la cortex cérébral d'un enfant (1904), de Santiago Ramón y Cajal

Les neurones: un approche historique

- En 1850 Hermann von Helmholtz observe expérimentalement les potentiels d'action en mesurant la vitesse de l'influx nerveux (~ 25 m/s).
- Santiago Ramón y Cajal a observé les cellules nerveuses par une technique de coloration cellulaire (prix Nobel de physiologie ou médecine en 1906 « *en reconnaissance de leurs travaux sur la structure du système nerveux* »).
- En 1952, Hodgkin et Huxley ont développé un modèle mathématique les potentiels d'action et les synapses (prix Nobel de physiologie ou médecine en 1963 « *pour leurs découvertes sur les mécanismes ioniques impliqués dans l'excitation et l'inhibition dans les parties périphériques et centrales de la membrane des cellules nerveuses* »).



Timbre de cellule nerveuse avec axone et conduction de l'impulsion - Suède, 1984

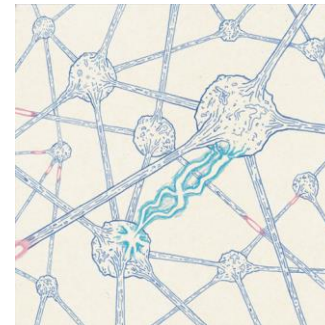
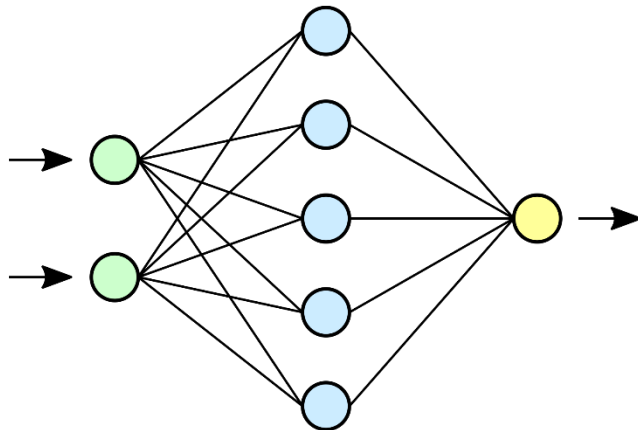
L'homme imite la nature: les réseaux neuronaux artificiels

- Inspiré par les incroyables capacités des neurones, les scientifiques ont voulu les imiter, donnant naissance à ce que l'on appelle les réseaux neuronaux artificiels
- Les neurones artificiels sont des modèles mathématiques qui simulent le fonctionnement des neurones biologiques.
- Les réseaux neuronaux artificiels sont à l'origine de systèmes de génération de contenu d'intelligence artificielle (ChatGPT, Bard ou DALL·E...)



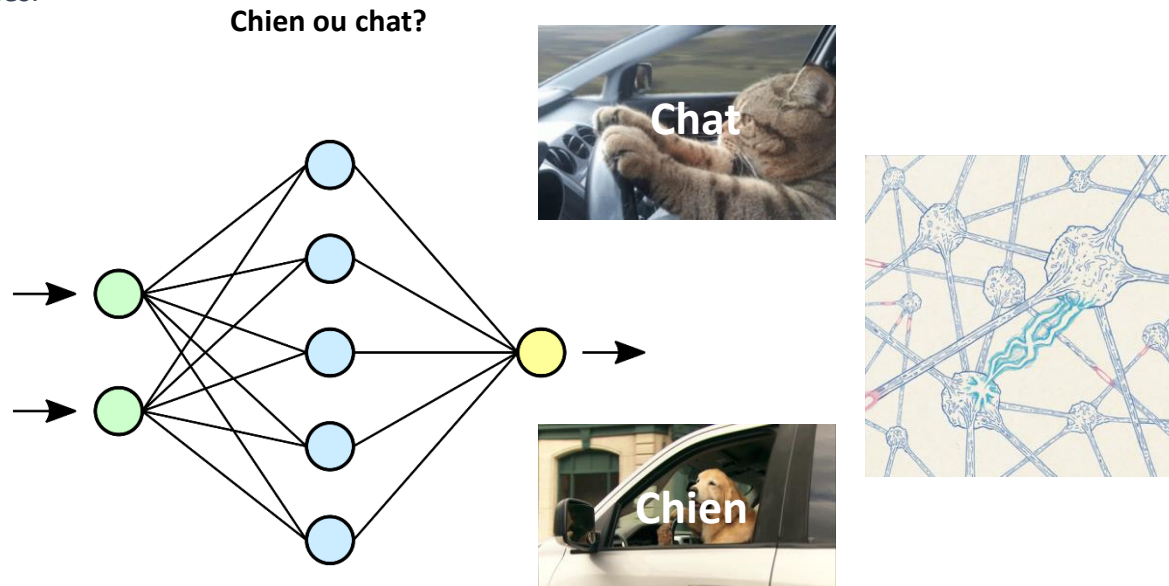
L'homme imite la nature: les réseaux neuronaux artificiels

- Les neurones artificiels et biologiques reçoivent des entrées, les traitent et produisent des sorties.
- Les neurones artificiels et biologiques sont connectés entre eux par des synapses, qui transmettent des informations d'un neurone à l'autre.
- Les neurones artificiels et biologiques utilisent des fonctions d'activation pour traiter les informations.
- Les neurones artificiels et biologiques peuvent apprendre et s'adapter en fonction des données sur lesquelles ils sont entraînés.



L'homme imite la nature: les réseaux neuronaux artificiels

- Les neurones artificiels et biologiques reçoivent des entrées, les traitent et produisent des sorties.
- Les neurones artificiels et biologiques sont connectés entre eux par des synapses, qui transmettent des informations d'un neurone à l'autre.
- Les neurones artificiels et biologiques utilisent des fonctions d'activation pour traiter les informations.
- Les neurones artificiels et biologiques peuvent apprendre et s'adapter en fonction des données sur lesquelles ils sont entraînés.



Les origines... Le *Perceptron*

- Dans les années 1950, Frank Rosenblatt imagine le *Perceptron*, un modèle de neurone artificiel à seuil, c'est-à-dire qu'il ne produit une sortie que si la somme pondérée de ses entrées dépasse un certain seuil.

Électronic 'Brain' Teaches Itself

The Navy last week demonstrated the embryo of an electronic computer named the Perceptron which, when completed in about a year, is expected to be the first non-living mechanism able to "perceive, recognize and identify its surroundings without human training or control." Navy officers demonstrating a preliminary form of the device in Washington said they hesitated to call it a machine because it is so much like a "human being without life."

Dr. Frank Rosenblatt, research psychologist at the Cornell Aeronautical Laboratory, Inc., Buffalo, N. Y., designer of the Perceptron, conducted the demonstration. The machine, he said, would be the first electronic device to think as the human brain. Like humans, Perceptron will make mistakes at first, "but it will grow wiser as it gains experience," he said.

recognize the difference between right and left, almost the way a child learns.

When fully developed, the Perceptron will be designed to remember images and information it has perceived itself, whereas ordinary computers remember only what is fed into them on punch cards or magnetic tape.

Later Perceptrons, Dr. Rosenblatt said, will be able to recognize people and call out their names. Printed pages, longhand letters and even speech commands are within its reach. Only one more step of development, a difficult step, he said, is needed for the device to hear speech in one language and instantly translate it to speech or writing in another language.

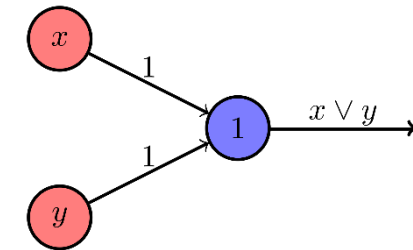
Self-Reproduction

In principle, Dr. Rosenblatt said, it would be possible to build Perceptrons that could reproduce them-

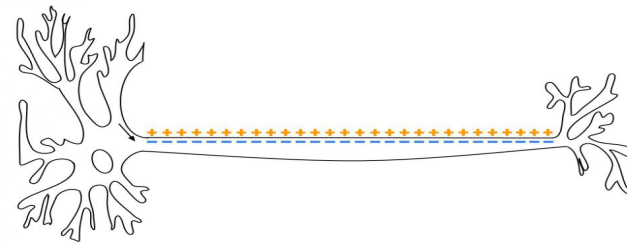
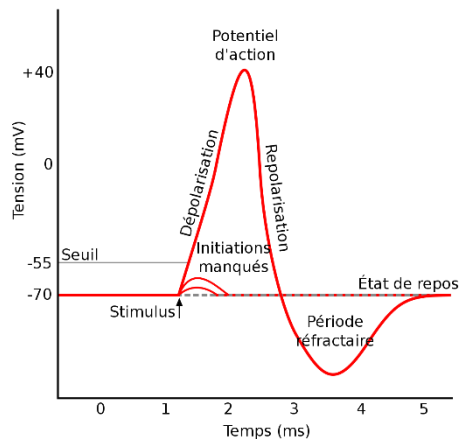
Les origines... Le *Perceptron*

- Dans les années 1950, Frank Rosenblatt imagine le *Perceptron*, un modèle de neurone artificiel à seuil, c'est-à-dire qu'il ne produit une sortie que si la somme pondérée de ses entrées dépasse un certain seuil.

Entrée 1 (x)	Entrée 2 (y)	$x + y \geq 1$	$x + y \geq 1 ?$	Sortie
0	0	0	non	0
0	1	1	oui	1
1	0	1	oui	1
1	1	2	oui	1

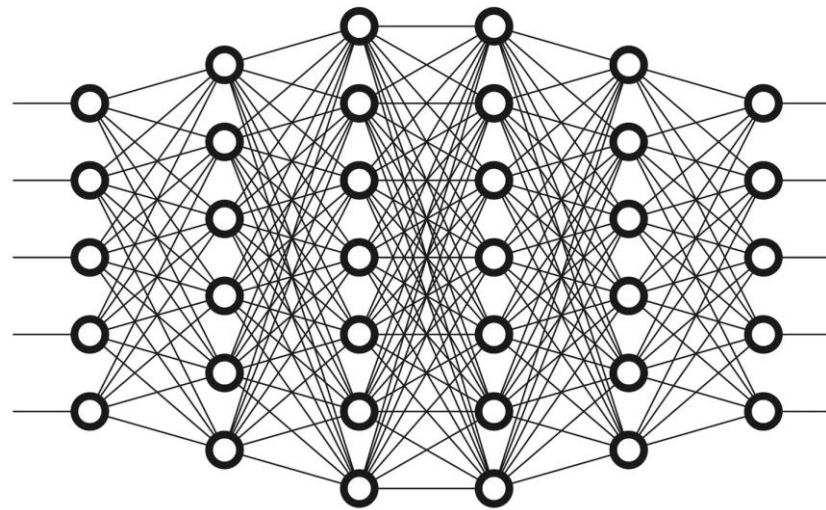


Modèle à seuil du perceptron



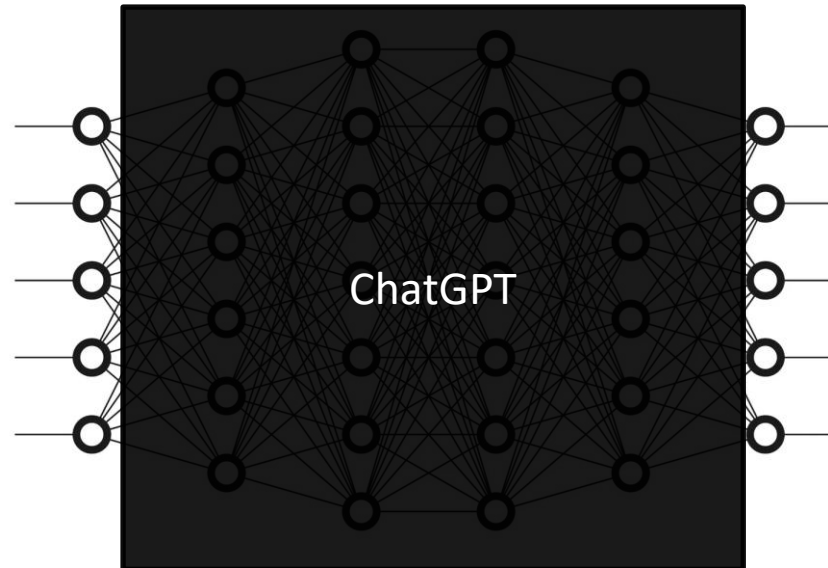
Les réseaux neuronaux artificiels et la compréhension du cerveau

- Dans la pratique, le fonctionnement interne des réseaux neuronaux artificiels est beaucoup plus complexe...



Les réseaux neuronaux artificiels et la compréhension du cerveau

- Dans la pratique, le fonctionnement interne des réseaux neuronaux artificiels est beaucoup plus complexe... On les traite souvent comme des "boîtes noires".
- Le cerveau humain reste encore une "boîte noire" pour nous aussi... la compréhension de son fonctionnement est encore très limitée...
- Les réseaux neuronaux artificiels nous offrent un modèle simplifié et peuvent nous aider à comprendre quelques fonctions cognitives complexes, comme la perception et la mémoire.



Les réseaux neuronaux artificiels et la poésie

Write a poem about collective phenomena in nature...

*In the great expanse of nature's wide embrace,
Lies a realm of collective phenomena's grace.
From the murmuring tides that ebb and flow,
To the dancing flames of a bonfire's glow.*

*Behold the symphony of a bird's melodious song,
As flocks gather, harmonizing all day long.
Their unified chatter, a chorus in the trees,
A reminder of nature's harmonious decrees.*

*On the horizon, storm clouds begin to preen,
As lightning strikes and thunder roars unseen.
A collaboration of forces, powerful and grand,
A dance of thunderbolts, conducted by nature's hand.*

*Beneath the waves, in a vibrant coral reef,
Tiny creatures thrive, brought together by belief.
Synchronized movements of a vibrant ballet,
A testament to nature's communal display.*

*In the autumn woods, a tapestry of colors unfurls,
As leaves fall, cascading in soft and gentle swirls.
United in their descent, like confetti on parade,
A collective departure, where beauty is made.*

Dans l'immense étreinte de la nature,
Se trouve un royaume de la grâce des phénomènes collectifs.
Des marées murmurantes qui s'écoulent et se refluent,
Aux flammes dansantes d'un feu de joie.

Admirez la symphonie du chant mélodieux d'un oiseau,
Alors que les troupes se rassemblent, harmonisant tout au long de la journée.
Leur bavardage unifié, un chœur dans les arbres,
Un rappel des décrets harmonieux de la nature.

À l'horizon, les nuages d'orage commencent à se pavaner,
Alors que la foudre frappe et que le tonnerre gronde invisible.
Une collaboration de forces, puissante et grandiose,
Une danse de coups de foudre, dirigée par la main de la nature.

Au fond des vagues, dans un récif corallien vibrant,
De minuscules créatures prospèrent, unies par la croyance.
Mouvements synchronisés d'un ballet vibrant,
Un testament à l'exposition communautaire de la nature.

Dans les bois d'automne, un tapis de couleurs se déploie,
Alors que les feuilles tombent, en cascade dans de doux et doux tourbillons.
Unies dans leur descente, comme du confetti en parade,
Un départ collectif, où se crée la beauté.

IA génératrice de poésie



Traduit par Bart



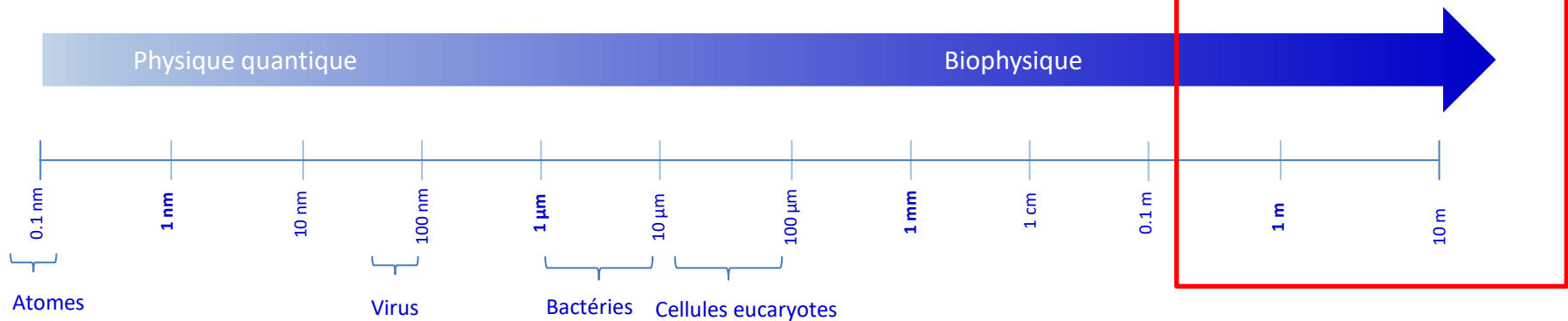
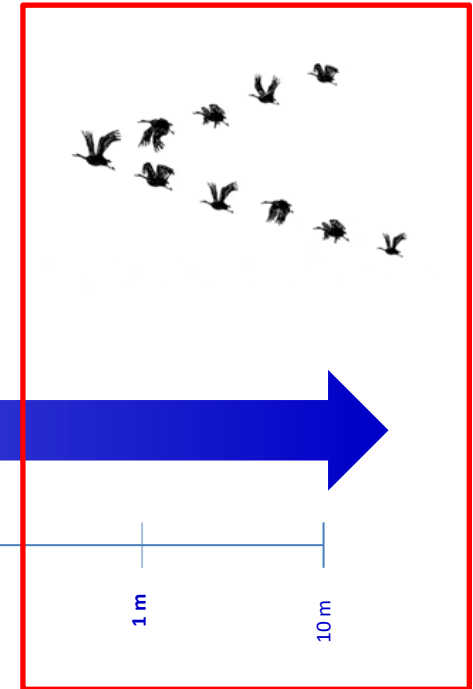
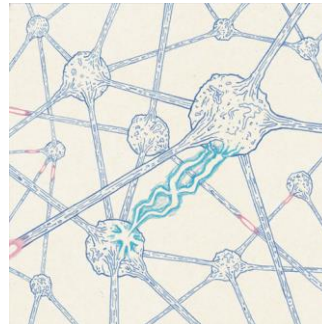
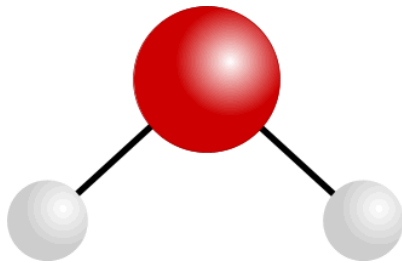
Idée pour exposée II: Désapprentissage Artificielle

- On a vu que les réseaux neuronaux artificiels peuvent apprendre...
- Peut un réseau artificielle désapprendre ou oublier?
- Mémoire et oublie artificielle



Le dernier arrêt: l'échelle des organismes et écosystèmes complexes

- La biophysique intègre les concepts de la physique, des mathématiques et de la chimie pour explorer une gamme variée de sujets, couvrant l'échelle moléculaire jusqu'à l'échelle macroscopique.
 - Molécules
 - Cellules
 - Organismes et écosystèmes complexes**



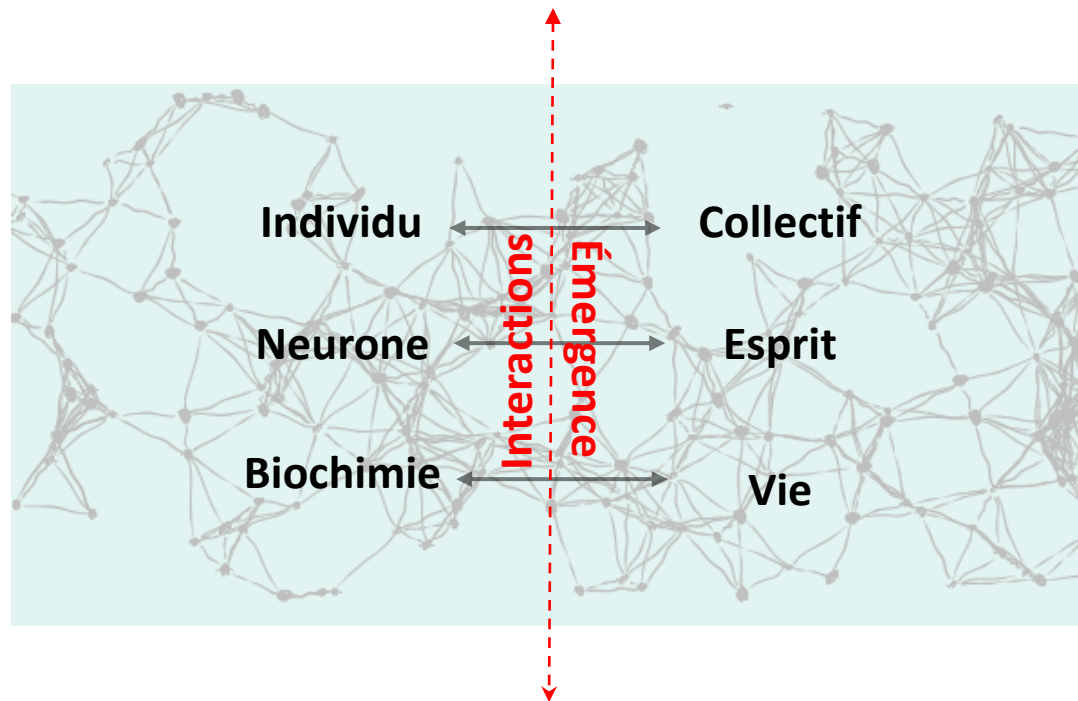
Les systèmes complexes

- À l'échelle macroscopique on peut observer des phénomènes collectifs dans des colonies d'organismes et dans des écosystèmes complexes.
- Un système complexe est défini comme un système composé de nombreux éléments en interaction, qui présentent un comportement collectif différent de celui obtenu par la simple juxtaposition des comportements individuels
- Cette définition est inspirée de la physique statistique



Les systèmes complexes: l'émergence

- Considérons un gaz confiné dans un compartiment. Si on ouvre l'accès à un autre compartiment, le gaz envahit tout l'espace disponible et la probabilité que les particules de gaz reviennent toutes en même temps dans le premier compartiment est infime
- Le comportement collectif du gaz est irréversible. Cependant, le comportement de chacune des particules considérée isolément est réversible
- C'est la physique statistique de Boltzmann qui permet de comprendre ce mystère en établissant un lien statistique entre le comportement des atomes (**l'individu**) et celui du gaz (**le collectif**)



Les phénomènes collectifs: les écosystèmes

- Les écosystèmes sont des systèmes complexes composés d'un grand nombre d'espèces vivantes et d'éléments non vivants, qui interagissent entre eux de manière complexe.
- Ces interactions peuvent conduire à des phénomènes collectifs, en générant des comportements qui émergent de l'interaction de nombreux individus.
- Les phénomènes collectifs jouent un rôle important dans le fonctionnement des écosystèmes. Ils contribuent à la régulation des populations, à la dispersion des espèces, à la protection des individus contre les prédateurs...



Les phénomènes collectifs: les écosystèmes

- La formation des bancs de poissons
- La formation des colonies d'insectes
- La symbiose et compétition entre des espèces différentes
- La migration des oiseaux



Les phénomènes collectifs: la migration des oiseaux

- L'un des aspects les plus remarquables des migrations d'oiseaux est leur nature collective. Les oiseaux migrent en groupes, ce qui présente de nombreux avantages. Les oiseaux en formation réduisent la traînée pour économiser de l'énergie, ils se relaient pour réduire la fatigue individuelle, et ils sont plus résistants aux prédateurs grâce à la vigilance collective.



Comment les oiseaux synchronisent-ils leur vol ? (Crédits: Brut.)

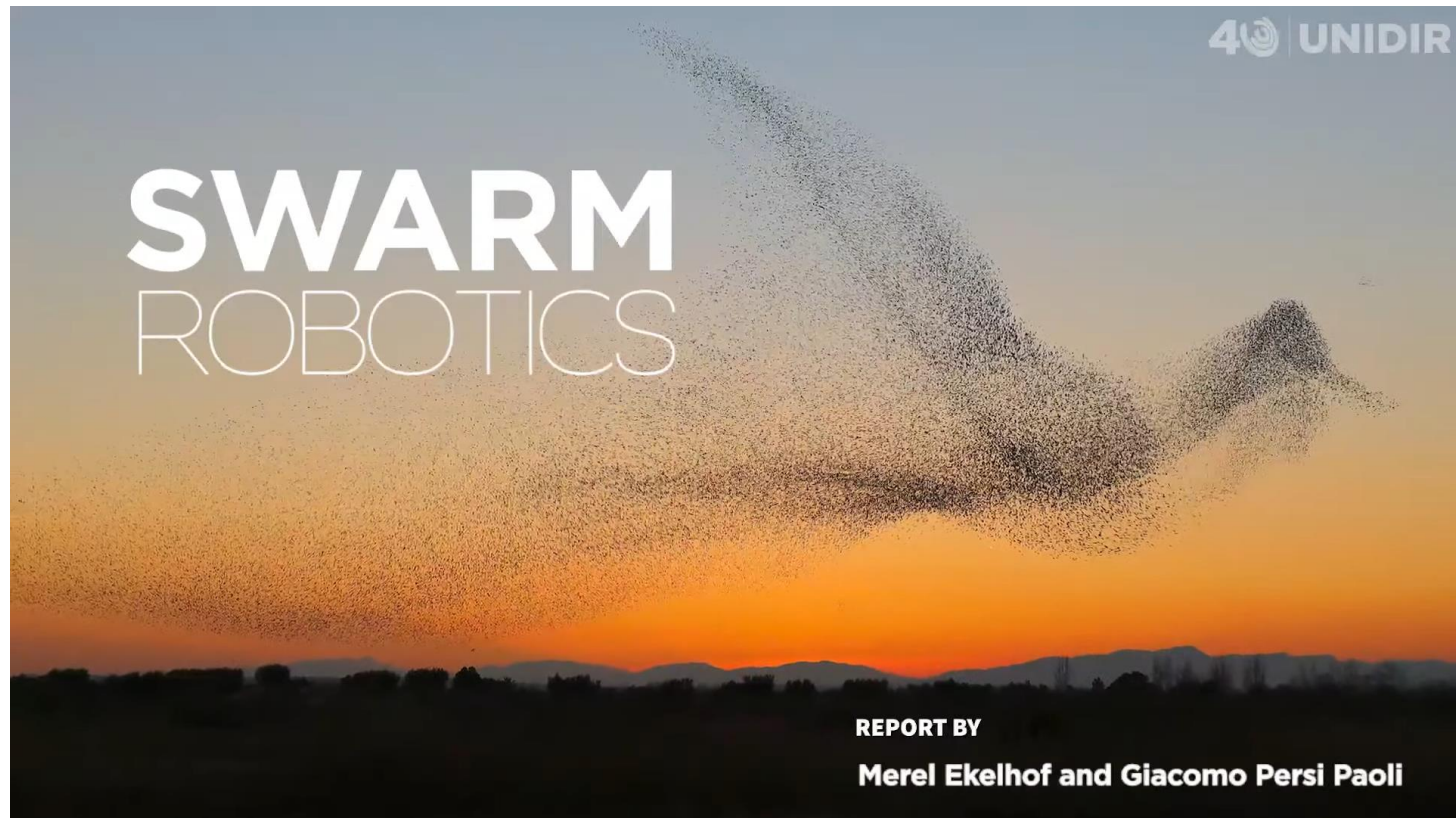
L'homme imite la nature: la robotique en essaim

- Les humains ont voulu s'inspirer des phénomènes collectifs, comme les migrations des oiseaux, pour inventer la robotique en essaim
- L'idée est d'étendre toutes nos connaissances en robotique individuelle pour créer une robotique collective
- Encore une fois, le passage de l'individu au collectif, mais maintenant artificiellement



L'homme imite la nature: la robotique en essaim

- La robotique en essaim a de nombreuses applications potentielles, notamment dans les domaines de la surveillance, de la logistique et de la défense. Par exemple, des essaims de robots pourraient être utilisés pour surveiller de grandes zones, pour livrer des biens ou pour défendre des infrastructures contre des attaques.



Idée pour exposée III: *More is different*

- La frontière entre l'individuel et le collectif a été clairement établie dans l'exemple du gaz
- Cependant, il existe de nombreux problèmes ouverts en physique (signalés par Anderson en 1972 dans l'article *More is different* dans lesquels cette frontière est encore floue

More Is Different

**Broken symmetry and the nature of
the hierarchical structure of science.**

P. W. Anderson