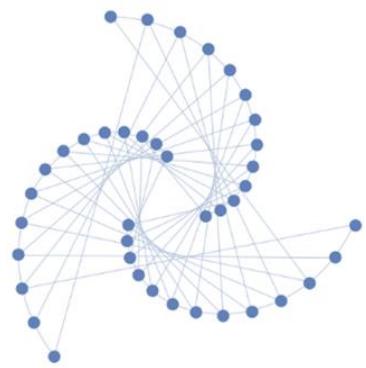


Transports et Transferts

Les formes de stockage modernes
d'information : le disque dur et le SSD



« Comment stocker et accéder à nos informations rapidement à une époque où la quantité de données croît de manière exponentielle ? »

Sommaire

I / Introduction	1
1. Le stockage de l'information	2
2. Les générations de stockage informatique	3
II / Le Disque Dur	6
1. L'historique	7
2. Les composants	10
3. Expérience n°1 : Stockage magnétique	11
4. Le fonctionnement	13
5. Expérience n°2 : Robot-Disque-Dur	15
6. Synthèse du Disque Dur 	20
III / Le Solid-State Drive (SSD)	22
1. L'historique	23
2. Les composants	24
3. Le fonctionnement	28
A. Qu'est-ce qu'un semi-conducteur ?	28
B. Le rôle d'un transistor	31
C. Les transistors dans le fonctionnement des SSD	35
4. Expérience n°3 : Simulation d'un Transistor à l'échelle électronique 	38
5. Synthèse du SSD 	43
IV / Les formes alternatives	45
1. Les Data Centers	46
2. Le Cloud	48
3. Le stockage ADN	50
V / Conclusion 	52
VI / Remerciements	54
VII / Glossaire et Sources	54

I / Introduction

De nos jours, l'informatique est un domaine qui ne cesse d'évoluer, entraînant une hausse de la quantité de données. Chaque individu possédant un appareil informatique possède des données, comme par exemple une liste de contacts sur un téléphone, un film sur un DVD ou bien des photos sur une clé USB. Aujourd'hui, les entreprises d'informatique se sont toutes lancées dans la course de l'innovation et cherchent à offrir aux clients les meilleures solutions pour accéder à leurs informations de la manière la plus simple et rapide possible.

Pendant la réalisation de ce TPE, nous avons essayé de comprendre comment fonctionnaient les principaux outils informatiques de stockage ainsi que leur évolution dans le temps. Pour cela, nous nous sommes demandé comment stocker et accéder à nos informations rapidement à une époque où la quantité de données croît de manière exponentielle.

Pour répondre à cette question, nous allons nous concentrer principalement sur les deux technologies les plus répandues dans le monde en ce qui concerne le stockage de données : les Disques Durs et la Mémoire Flash SSD.

Puis, nous verrons brièvement comment est apparu le Disque Dur, comment il fonctionne ainsi que ses limites. Pour illustrer nos propos, nous vous proposerons une démonstration de son fonctionnement grâce au robot que nous avons construit sur mesure pour l'occasion.

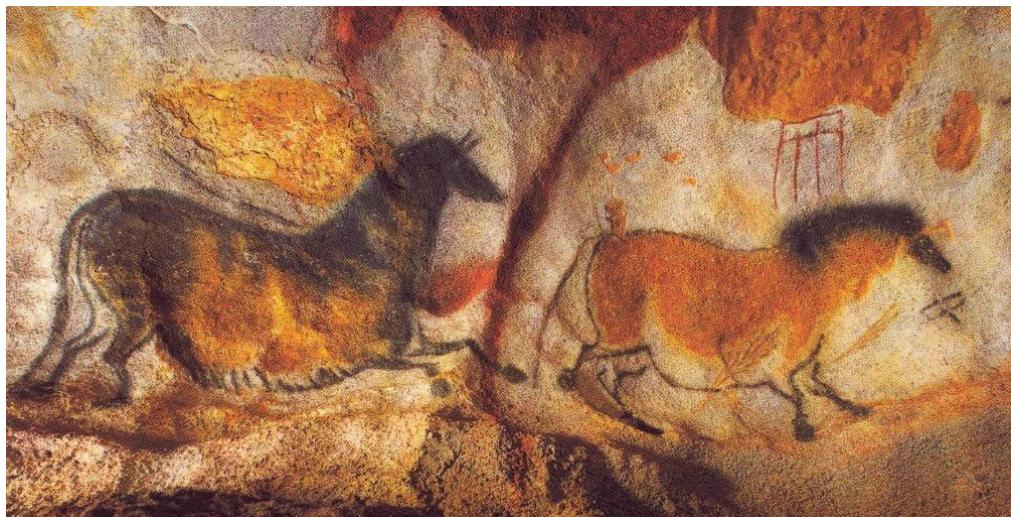
Ensuite, nous allons vous exposer la manière dont le SSD s'est fait une place dans le monde du stockage des données. Nous allons également vous expliquer son fonctionnement, ses points forts et ses inconvénients. Pour soutenir nos propos, nous vous présenterons une simulation du fonctionnement d'un transistor à porte flottante, élément majeur du fonctionnement d'un SSD. Puisque cette technologie fonctionne grâce à des principes électroniques, nous avons choisi de coder nous-même un programme informatique qui simule le fonctionnement d'un transistor.

Enfin, puisque le monde de l'informatique est un monde qui évolue sans cesse, nous avons également choisi de rester ouvert à toute futures possibilités en vous proposant quelques technologies qui ont récemment vu le jour et qui pourraient, dans quelques années, devenir des révolutions dans le domaine informatique. Nous allons donc parler entre autres des Data Centers, du Cloud et du Stockage ADN.

Pour finir, nous confronterons les deux technologies que sont les Disques Durs et la mémoire flash SSD à plusieurs niveaux et nous utiliserons nos recherches ainsi que les compétences acquises durant ce TPE pour répondre à notre problématique en concluant sur le stockage de masse de demain.

1. Le stockage de l'information

Stocker des données a toujours été un besoin primordial pour l'Homme, comme le montrent ces peintures préhistoriques utilisées pour garder des informations devenues aujourd'hui des vestiges de notre Histoire.



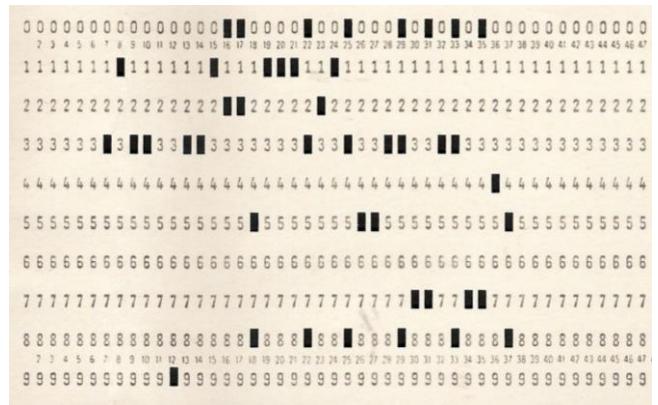
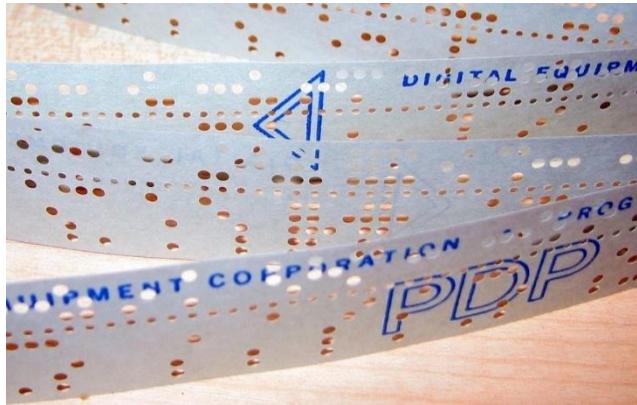
Les innovations technologiques se sont ensuite succédées au fil des siècles pour donner place à ce que nous connaissons aujourd'hui comme l'informatique. Cela a entraîné de nouveaux besoins qui ont eux-mêmes abouti à une première génération des supports de stockage numérique...



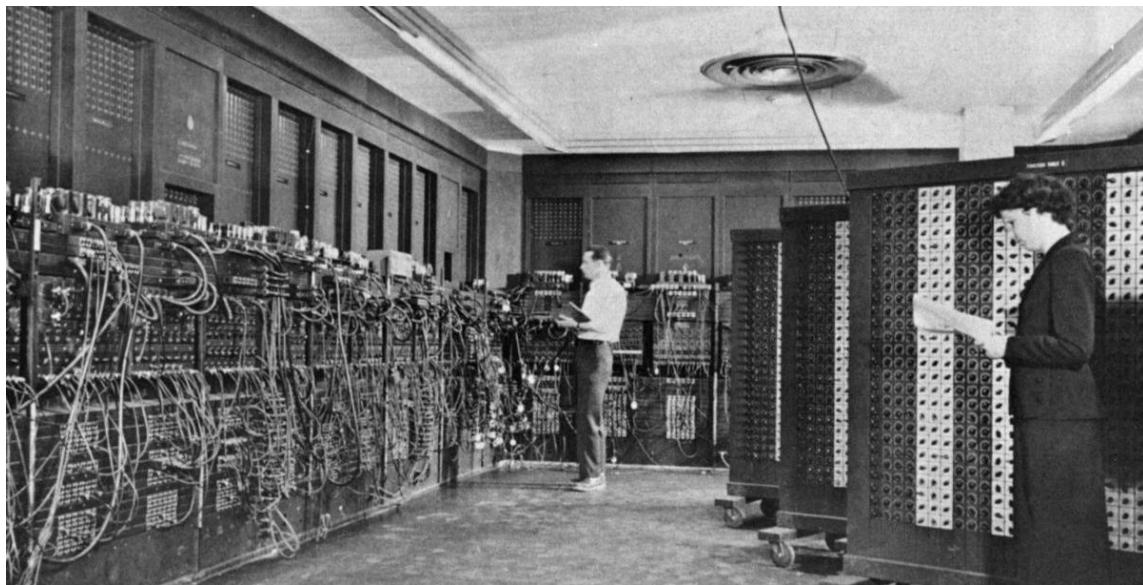
2. Les générations de stockage informatique

Cette première génération est composée essentiellement de supports physiques comme les cartes et les rubans perforés.

Cette technologie reposant sur le stockage physique des données a donc été utilisée pour archiver les données dans le monde jusqu'au milieu du XX^{ème} siècle.



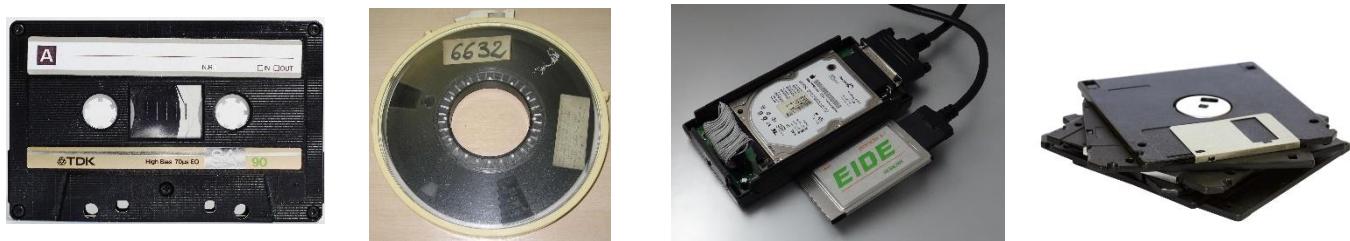
C'est cette période d'après-guerre des Trente Glorieuses qui marque l'arrivée des premiers ordinateurs personnels et d'Internet. Par exemple, l'ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer), est en 1945 le premier ordinateur entièrement électronique. Ce type d'outils a favorisé l'accroissement de la quantité de données. Des systèmes de stockage de masse ont ainsi été mis en place.



Ce terme de stockage de masse représente le stockage de données très volumineuses. Cette forme de stockage informatique est omniprésente dans notre vie et nous la retrouvons dans nos ordinateurs, nos téléphones ou nos tablettes, par exemple. D'autres générations de stockage sont apparues dans les années 80 pour compenser cet accroissement de données.



Parmi elles, la deuxième génération représente l'arrivée des supports magnétiques comme la cassette, la bande magnétique, le disque dur et la disquette.



La troisième génération caractérise l'apparition des supports optiques comme les CD (Compact Disk), le DVD (Digital Video Disk) ou le Blu-ray.



Les supports de la quatrième génération sont, quant à eux, les clés USB, cartes SD et cartes MicroSD.

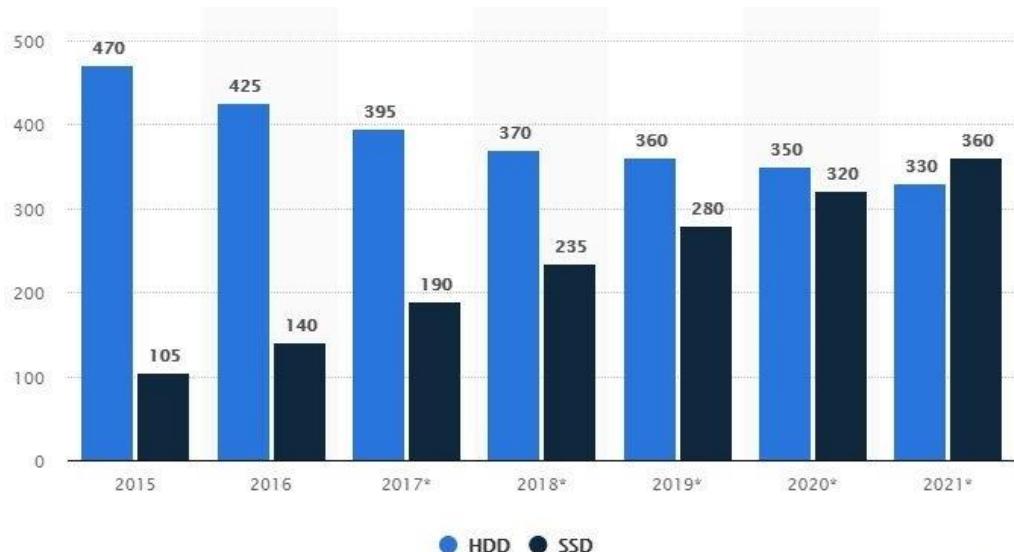


Enfin, la cinquième génération est encore en train de se développer actuellement. Elle est notamment marquée par la mémoire flash SSD.

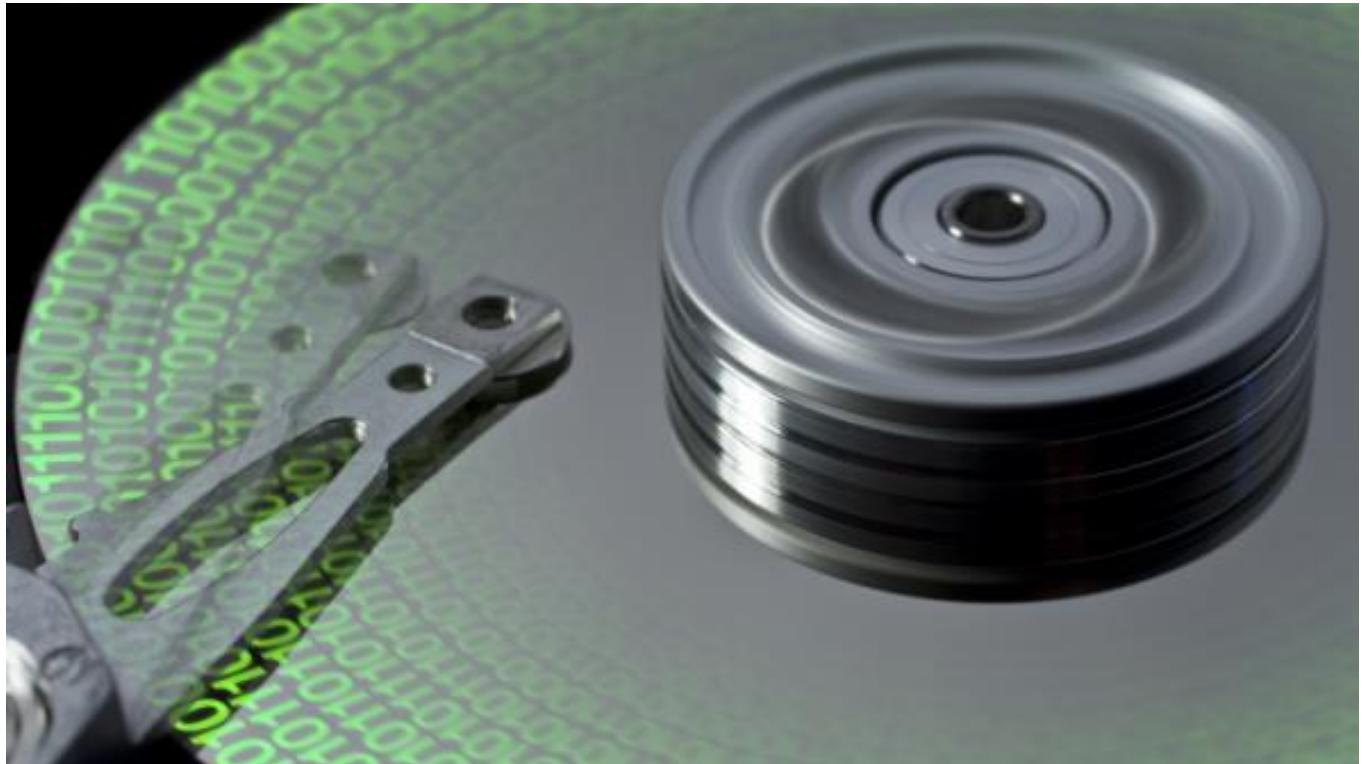


Cependant, selon la toute dernière étude de Statista, plus d'un tiers des unités de stockage livrées en 2018 sont des modèles SSD (235 millions de SSD contre 370 millions de disques durs) et en 2021, la vente de SSD devrait dépasser pour la première fois celle des disques durs (360 millions de SSD contre 330 millions de disques durs).

Le Disque Dur ou le SSD sont donc des solutions apportées à la société pour permettre d'interagir avec nos données de manière simple et rapide. Ces deux technologies sont les plus répandues aujourd'hui malgré le fait qu'elles datent respectivement de 1956 et de 1990. Cela signifie donc que le stockage de données connaît des limites et qu'il n'est optimisé qu'avec certaines technologies...



II / Le disque dur



Dans cette partie, nous allons nous intéresser au Disque Dur et à ce qui fait de lui, pour le moment, la technologie la plus répandue au XXIème siècle en ce qui concerne le stockage de données.

1. Historique du Disque Dur



1956 : Une Révolution

Le premier disque dur de l'histoire voit le jour en 1956 après une demande de l'US Air Force à l'entreprise IBM (International Business Machines Corporation). Le RAMAC 305 (Random Access Method of Accounting and Control) est ainsi créé.



Mais comme vous pouvez le voir, nos disques durs actuels n'ont rien à lui envier. La capacité de stockage du RAMAC 305 était évaluée à environ 5 Mo. Pour vous donner une idée, la capacité moyenne aujourd'hui varie entre 500Go et 1 To. De plus, le disque dur créé par IBM pesait plus d'une tonne alors que le poids moyen d'un disque dur de nos jours est de 500g.



Ce disque dur était uniquement consacré aux grandes entreprises puisque son prix s'élevait à environ 10 000 dollars par Mo. Il était notamment utilisé pour les longs calculs et l'archivage des données.



1970 : L'innovation

En 1970, HP crée son premier disque à têtes mobiles, le HP-7900A. A partir de cette époque, les disques durs ont commencé à remplacer les tambours et les bandes



1980 : L'explosion des performances et des prix

Les années 80 marquent l'apparition de disques durs encore plus performants que les précédents. Ils sont accessibles aux particuliers et sont utiles pour le stockage d'informations de caméscopes, lecteurs DVD, consoles de jeux vidéo etc.



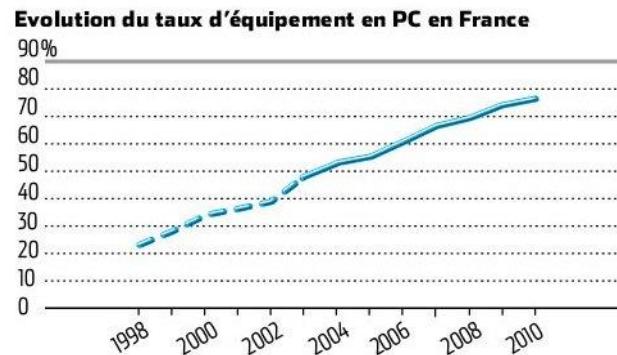
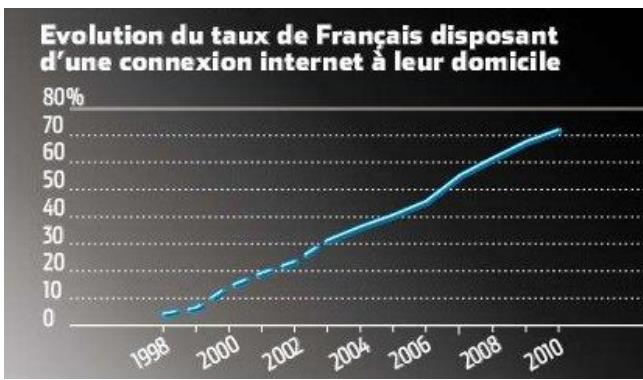
1990 : Démocratisation du Disque Dur

En 1990, les prix des disques durs vont être démocratisés et presque tous les ordinateurs personnels seront équipés d'un disque dur.

1998 : IBM voit grand, trop grand...

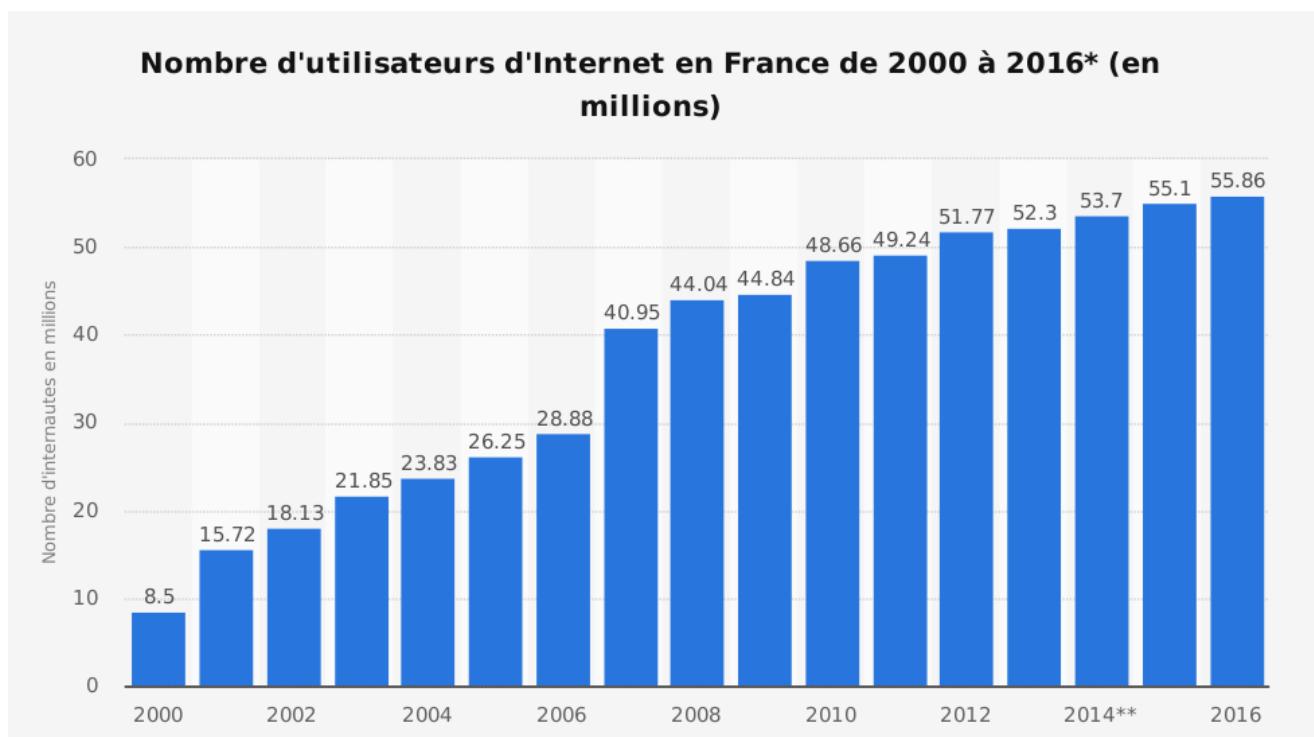
IBM commercialise en 1998 le tout premier disque dur de 25 Go. Le Deskstar 25 GP est alors néanmoins considéré par la presse comme inutile car disproportionnée par rapport aux besoins réels des particuliers. En effet, Internet n'existe pas à l'époque et l'utilisation des ordinateurs était encore limitée.



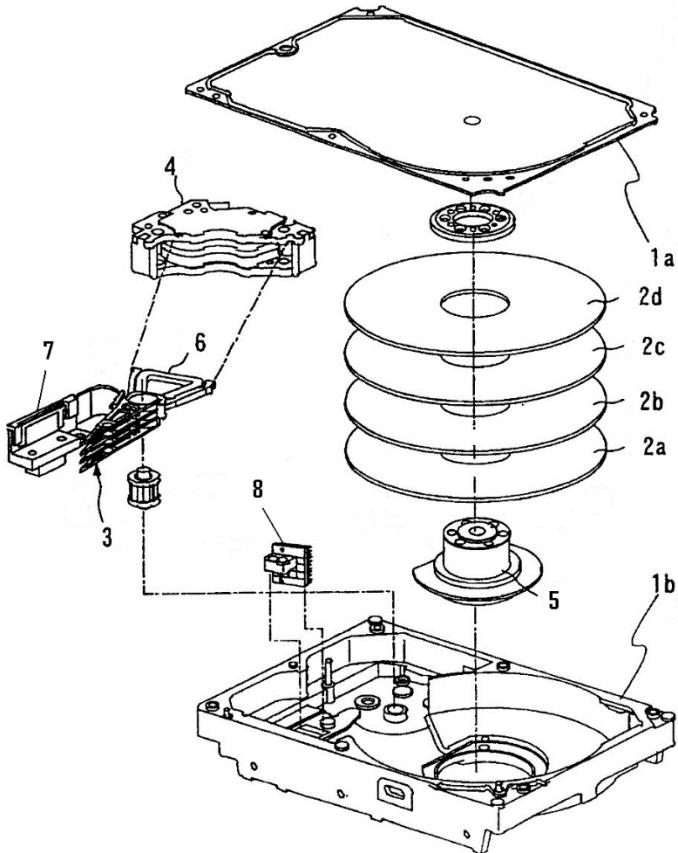


2000 : La vague Internet

Dans les années 2000, les ventes d'ordinateurs personnels ont explosé et, en 2011, le besoin du marché en disques durs était évalué à 700 millions d'unités par an grâce à la Révolution d'Internet entraînant une augmentation des données.



2. Composants du Disque Dur



Ces plateaux sont reliés à l'axe moteur (5) mais aussi aux bras mobiles (3) au bout desquels se trouvent les têtes de lecture/écriture pilotées grâce à un actionneur de tête (6) qui fonctionne grâce à la présence d'un aimant (4) (aucun frottement pour éviter de l'abîmer). Elle vole sur un coussin d'air à quelques microns de distance du plateau (1 micron = 0.001 mm).

Les jumpers, également appelés cavaliers, (8) permettent de réinitialiser les paramètres du BIOS. Cette opération s'appelle la « configuration de secours » du disque dur.

Pour finir, les connecteurs (7) sont tout simplement les ports reliant le disque dur à l'ordinateur.

Si un disque dur est exposé à l'air ambiant, une seule particule de poussière pourrait le rendre inutilisable.

C'est pourquoi ils sont assemblés dans des salles dites « blanches » afin qu'aucun élément indésirable ne pénètre dans le boîtier. Le disque dur peut également être rendu inutilisable par un phénomène appelé « l'atterrissement » durant lequel la tête de lecture touche le plateau et raye les disques.

Pour s'assurer qu'aucune particule n'arrive sur les plateaux (2a, 2b, 2c et 2d), le boîtier est fabriqué de manière à être étanche et hermétiquement fermé (1a et 1b).

3. Expérience n°1 : Stockage magnétique

Nous venons de voir les différents composants d'un disque dur mais ne savons pas encore parfaitement comment les données sont stockées. On émet donc l'hypothèse selon laquelle l'information est stockée dans les Disques Durs sur un support magnétique.



Pour des raisons financières, nous avons utilisé un disque dur issu d'un vieux ordinateur inutilisé

Si cette hypothèse s'avérait vraie, on pourrait ainsi supprimer les fichiers du disque en le mettant en contact avec aimant puissant. La partie magnétique du Disque Dur est le plateau. Nous avons donc démonté un vieux disque dur dont nous ne nous servions plus puis avons frotté un aimant à ce plateau.

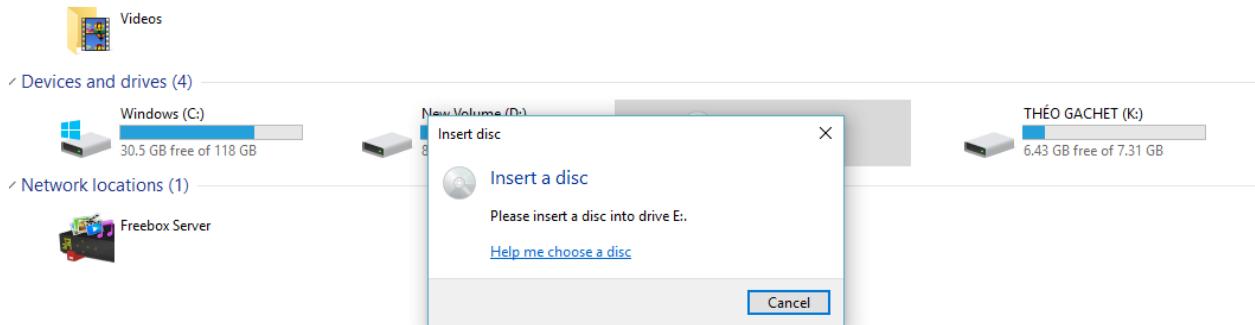


Disque démonté



Disque sans le plateau

Nous avons ensuite remonté le disque et l'avons inséré mis en place dans un ordinateur.
Voilà ce qui s'affichait lorsque nous voulions accéder au disque...

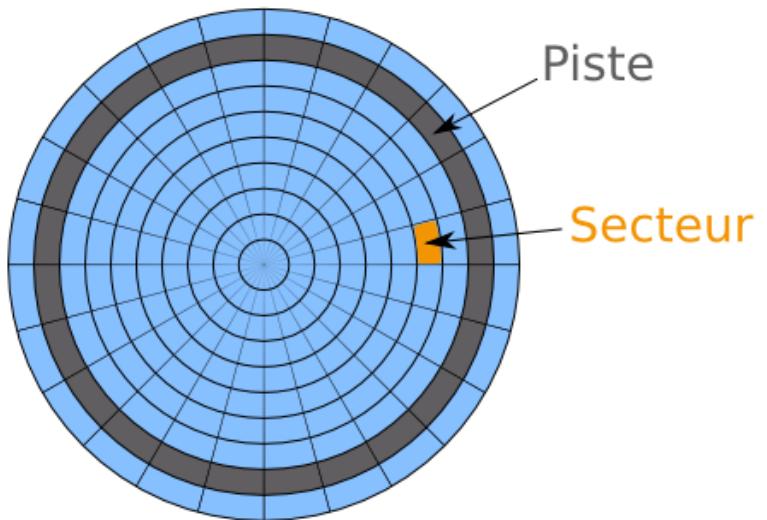


Le disque n'était pas reconnu par l'ordinateur

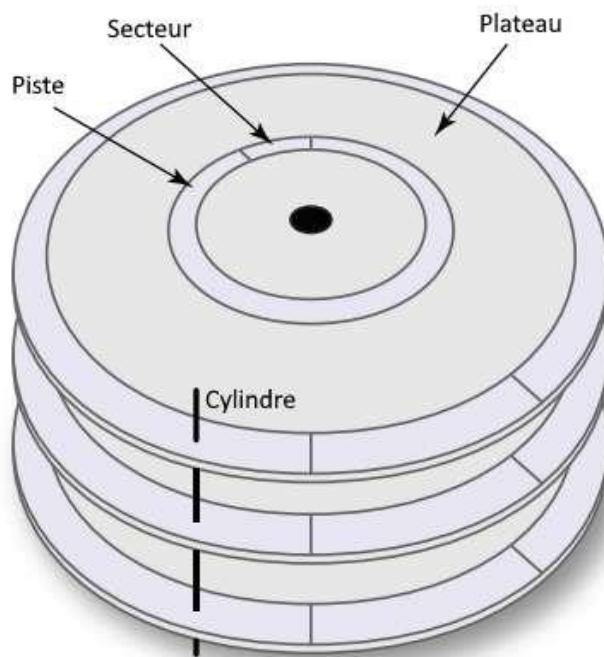
Cette expérience rapide et simple à réaliser prouve bien que, dans les Disques Durs, le stockage de données s'effectue sur un support magnétique qu'est le plateau. Nous allons donc détailler ce principe dans la partie suivante...

4. Fonctionnement d'un Disque Dur

La plupart des DD ont des plateaux qui tournent à environ 7200 tours/minute. Chaque plateau contient des pistes divisées en secteurs.



Un disque dur comporte généralement 1 à 8 plateaux qui tournent à plusieurs milliers de tours par minutes. Un Cylindre est l'ensemble des données sur une même piste mais sur des plateaux différents.



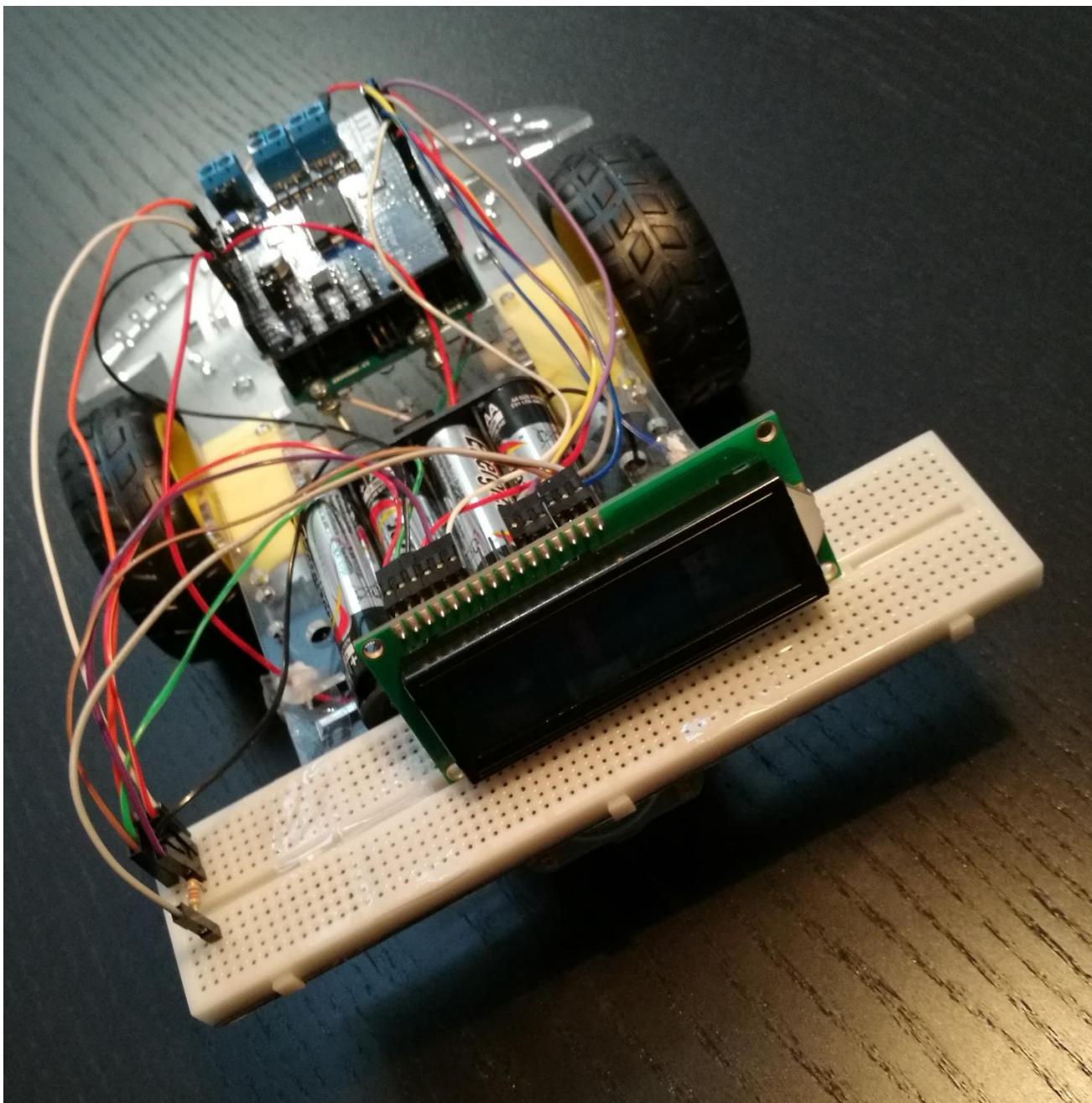
La tête de lecture est chargée en électricité et dépose des charges sur la surface magnétique du plateau. Ces charges positives ou négatives correspondent au système binaire (0 ou 1).



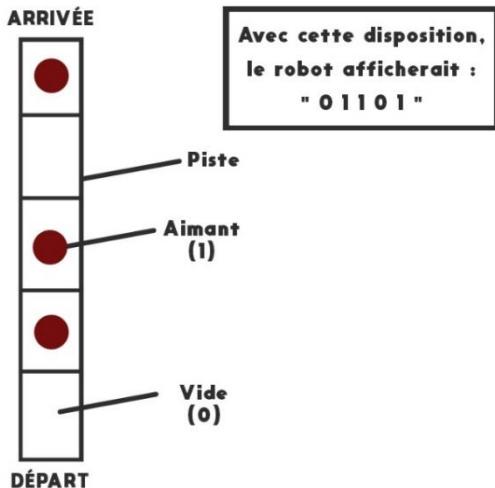
Ces 0 ou 1 sont appelés des bits (« *binary digit* »). Chaque cm² de disque peut contenir plus de 30 000 bits. Tout cela est contrôlé grâce à une carte électronique reliée à l'ordinateur.



5. Expérience n°2 : Robot-Disque-Dur



Nous venons de voir comment fonctionnait un Disque Dur. Afin de mieux comprendre son principe mécanique, nous avons réalisé de A à Z un robot qui nous permet d'illustrer ce qui a été dit précédemment mais à plus grande échelle. Cependant, les principes utilisés dans notre robot sont similaires à ceux utilisés dans les Disque Durs classiques...

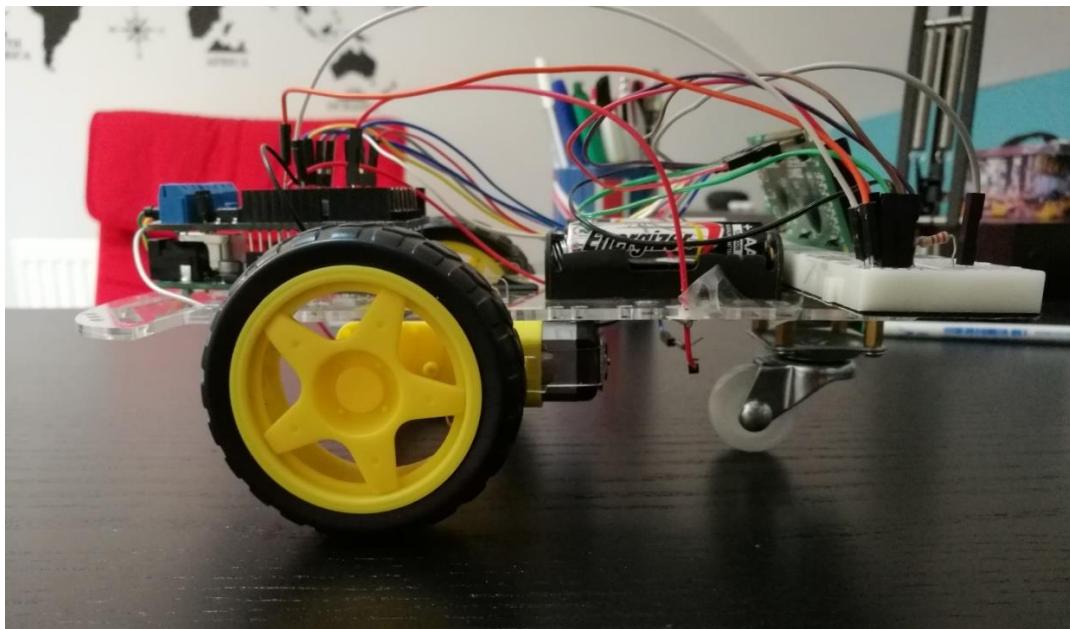


- Voilà à quoi correspondent les éléments de notre robot :

La plaquette en plastique joue le rôle d'une piste de Disque Dur. Elle contiendra les aimants.

Ces aimants représentent les 1. Quand il n'y a pas d'aimant dans une case de la plaquette, le signal reçu est de 0.

Notre robot se déplace tout seul sur la plaquette pour lire les 0 ou les 1. Il représente la tête chercheuse.

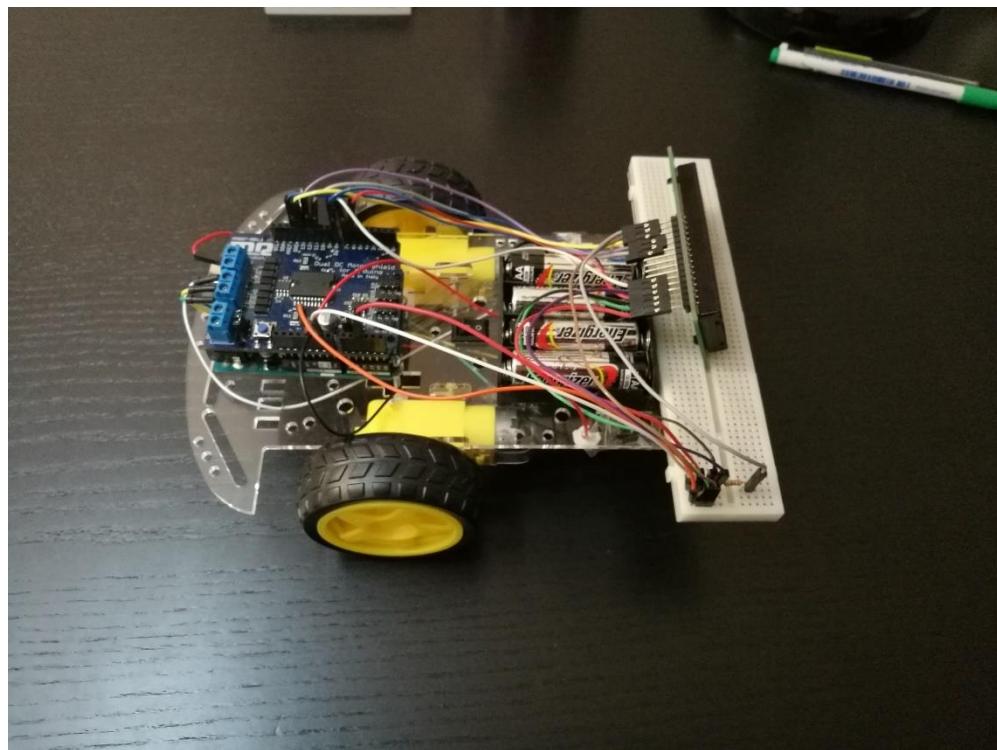


- Voici maintenant comment agit notre robot :

Dans un disque dur, la tête chercheuse se déplace sur le disque grâce à un bras motorisé. Notre robot utilise des roues. Il va s'arrêter sur chaque case du plateau (cela correspond à chaque secteur de la piste d'un disque dur réel). Grâce à un Interrupteur Lame Souple (ILS), il va détecter la présence ou l'absence d'aimant.



Un « ILS » est un interrupteur qui se ferme lorsqu'il est attiré par un champ magnétique. Cela est rendu possible grâce à une borne en fer attirée par l'aimant.



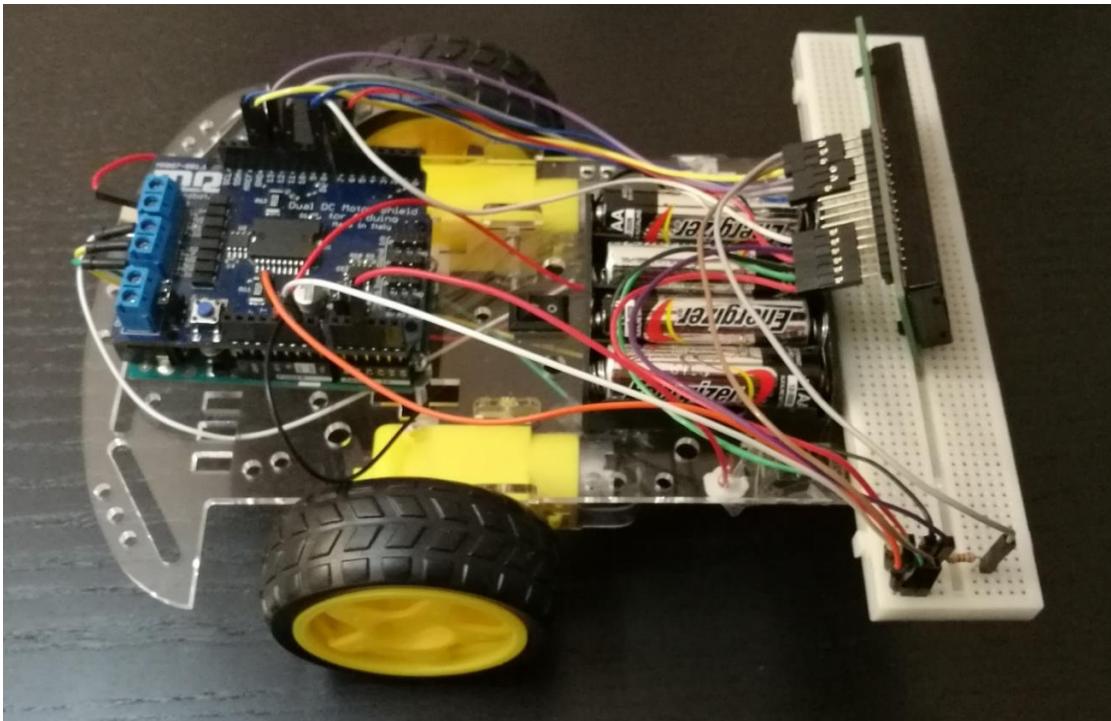
Pendant l'avancée de notre robot, nous pourrons suivre en temps réel la lecture des cases grâce à un écran LCD fixé et relié au robot. Il affichera au fur et à mesure si la donnée lue est un 0 ou un 1. A la fin de son parcours, il affichera une suite de 0 et de 1 correspondant aux données qu'il aura lues.

Grâce à notre code élaboré pour l'occasion, notre robot n'est pas programmé pour affiché une seule suite de bits. En effet, on peut changer la position des aimants et choisir d'en mettre ou de ne pas en mettre dans chaque case individuellement.

- Particularité et caractéristiques de notre robot :

Notre robot se déplace sur 6 cases. On dit que c'est un robot « 6 bits ».

Avec ces 6 cases (6 bits), on peut créer $2^6 = 64$ suites possibles de 0 et de 1...



Notre robot peut donc lire 64 suites différentes. En d'autres termes, notre robot peut lire et stocker 64 caractères (cela est suffisant pour lire l'alphabet en minuscule, en majuscule, les chiffres ainsi que quelques caractères spéciaux). De plus, nous avons choisi de nous contraindre à 6 bits pour que l'expérience soit simple à comprendre mais nous pouvons changer à tout moment le nombre de bits de notre robot en modifiant un simple nombre dans le code. Nous avons donc créé un mini-disque-dur entièrement fonctionnel.

0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1
0	0	0	1	1	
0	0	0	1	0	
0	0	1	1	0	
0	0	1	1	1	
0	0	1	0	1	
0	0	1	0	0	

0	1	1	0	0	0
0	1	1	0	1	
0	1	1	1	1	
0	1	1	1	0	
0	1	0	1	0	

1	1	0	0	0	0
1	1	0	0	1	
1	1	0	1	1	
1	1	0	1	0	
1	1	1	1	0	
1	1	1	1	1	
1	1	1	0	1	
1	1	1	0	0	

1	0	1	0	0	0
1	0	1	0	1	
1	0	1	1	1	
1	0	1	1	0	
1	0	0	1	0	
1	0	0	1	1	
1	0	0	0	1	
1	0	0	0	0	

Combinaisons possibles avec seulement 5 bits, par exemple

Pour découvrir le robot en action ainsi que les étapes de sa construction, nous vous invitons à visionner la vidéo intitulée « ROBOT_GROUPE24 » dans le dossier ANNEXE...

Ce robot a été codé en langage Arduino, voici son code :

ROBOT_final

```
#include <LiquidCrystal.h>

const int input1 = 9;
const int enA = 3;

const int input3 = 2;
const int enB = 5;

const int bufferSize = 5;
const int dT = 500;

String mot = "";
char lettre = 0;

int a;

int tab[6];

LiquidCrystal lcd(6, 7, 8, 11, 12, 13);

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    pinMode(input1,OUTPUT);
    pinMode(enA, OUTPUT);
    pinMode(input3, OUTPUT);
    pinMode(enB, OUTPUT);
    lcd.begin(16, 2);
    lcd.clear();

    for (int n = 0; n < 6; ++n)
    {
        demarrage();
        delay(dT);
        arret();
        a = lire();
        tab[n] = a;
        lettre += apow(2, n);
        Serial.println (a);
        //lcd.clear();
        //lcd.print(a);
    }
}

void loop()
{
}

void demarrage()
{
    digitalWrite(input1, HIGH);
    analogWrite(enA, 240);
    digitalWrite(input3, HIGH);
    analogWrite(enB, 245);
}

void arret()
{
    digitalWrite(input1, LOW);
    analogWrite(enA, 0);
    digitalWrite(input3, LOW);
    analogWrite(enB, 0);
}

int lire()
{
    delay(1000);
    for (int i = 0; i < bufferSize; ++i)
    {
        delay(10);
        if (analogRead(A2) < 100)
            return 1;
    }
    return 0;
}
```

6. Synthèse du Disque Dur

As we saw earlier, the Hard Disk was developed about sixty years ago. Nevertheless, this technology has considerably stopped evolving since 2010. This technology is now considered to have "reached maturity" because it is still present in the market today but it shows no form of evolution.

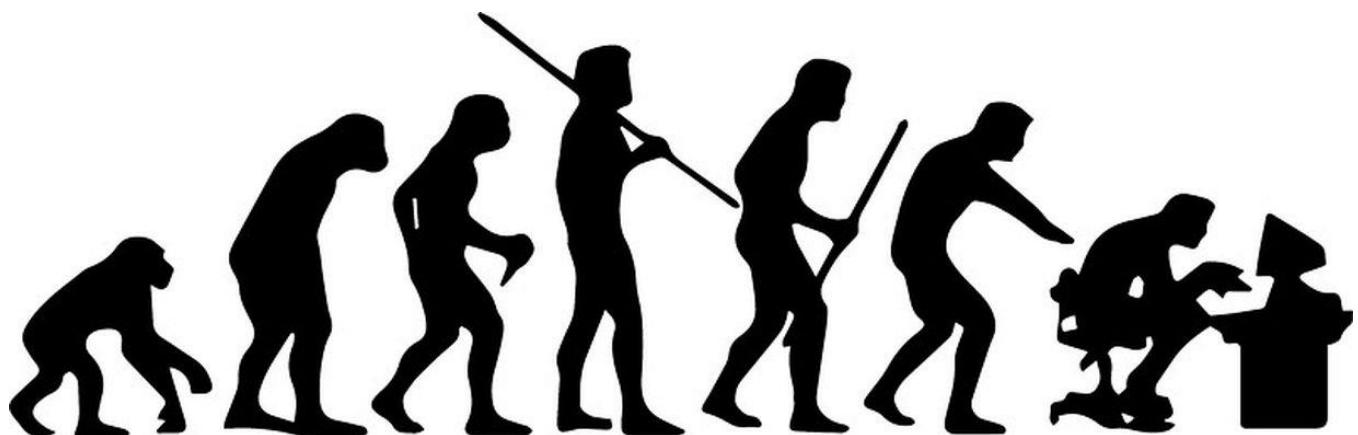


However, it offers many advantages:

Advantages
Low price
Great storage capacity (500 Go on average)
Modular memory according to the needs (150 Go, 500 Go, 1 To)

But also many disadvantages, mainly due to its mechanical operation:

Disadvantages
Slowness
Big electricity consumption to keep the trays rotating
Noise caused by mechanical movements
They are not extremely reliable and poorly support movement during operation, especially shocks. When the head and the tray come into contact, the disc becomes out of service. This phenomenon is called a "disk crash" and it causes the loss of all data.



These numerous drawbacks were the main factor that led to the beginning of a revolution in the field of computer data storage in recent years ...

III / Le Solid-State Drive (SSD)



Cette révolution a donné naissance au Solid-State Drive, plus connu sous le nom de SSD. Il offre une alternative au Disque Dur grâce à un fonctionnement très différent...

1. Historique du SSD

Au début des années 1990, les SSD étaient basés sur des types alternatifs de RAM, comme le disque SATA III qui proposait une mémoire de 120 Go.

Dès 1991, le titre de « premier SSD moderne » peut être attribué à SanDisk qui commercialise pour la 1^{ère} fois un disque dur à mémoire flash. Il coutait 1 000 000 \$ et pouvait stocker 20Mo. Cela ne représente que 2 ou 3 photos haute résolution de nos jours.



Avec 1 dollar (0.87 €), on avait donc 20 octets. Cela permettrait aujourd'hui de stocker 5 nombres.

À ce prix exorbitant, le SSD n'était donc presque jamais utilisé, et encore moins par le grand public. Néanmoins, il devient abordable au grand public à partir de l'année 2005.

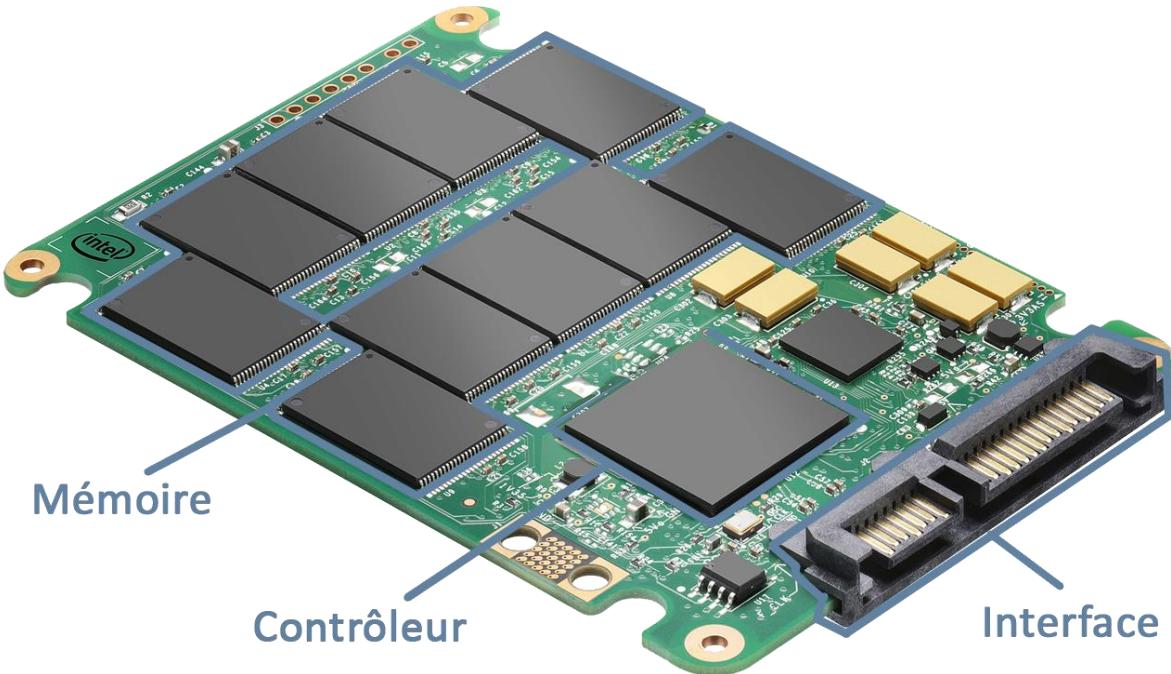
Malgré cela, les SSD restent tout de même 3 fois plus cher que les Disques Durs classiques.

Cependant, depuis de nombreuses années, le prix des SSD continue de baisser : 1 Go de stockage SSD coûte aujourd'hui 0.27 €, ce qui fait que le prix du SSD a été divisé par 300 millions en 30 ans.

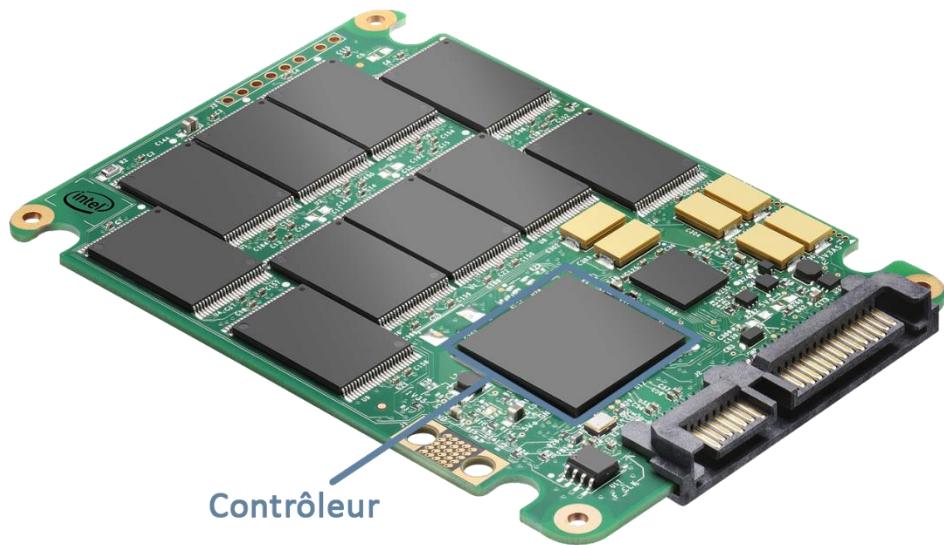
1990
0.87 €
→ 20 octets

2019
0.27 €
→ 1 milliard d'octets

2. Les composants d'un SSD



Les principaux éléments d'un disque dur SSD sont un contrôleur, une mémoire et une interface hôte.



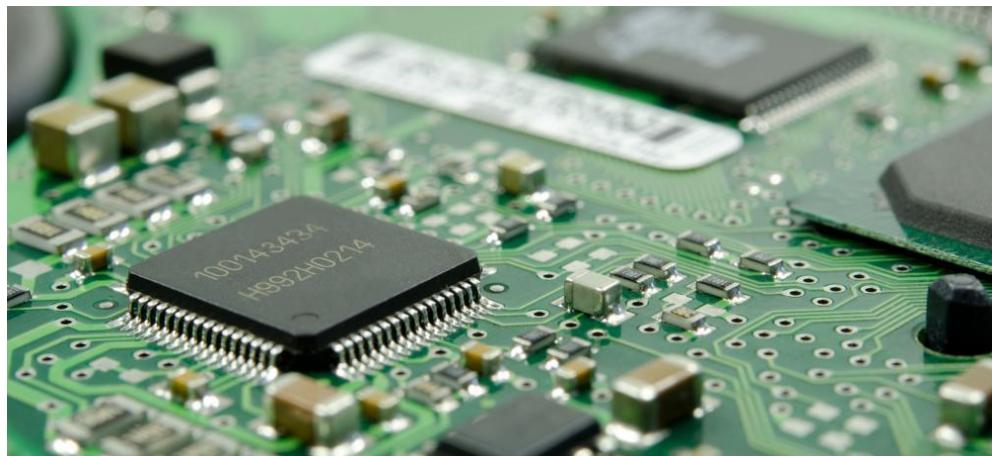
Le contrôleur intègre toute l'électronique qui relie les composants de la mémoire NAND à l'ordinateur hôte. Ce contrôleur est un processeur intégré qui exécute un code au niveau du microprogramme. C'est grâce à lui qu'un SSD pourra avoir de bonnes ou mauvaises performances.

Le contrôleur est donc très important et effectue ainsi de nombreuses fonctions :

- La lecture et l'écriture du cache :

En informatique, le cache est un composant matériel qui stocke des données afin que les futures demandes de ces mêmes données soient traitées plus rapidement grâce à la mémorisation du protocole d'accès ou d'exécution.

Sur Internet, son équivalent serait l'historique, il permet d'accéder à un site Internet déjà recherché rien qu'en entrant les premières lettres de ce site. D'ailleurs, lorsque l'on réinitialise son ordinateur, on dit que l'on « *vide le cache* ».



- Le cryptage :

Le cryptage est le processus qui consiste à coder un message ou une information de manière à ce que seules les parties autorisées puissent y accéder. Cela renforce la sécurité.



- Le nivellation d'usure (« Wear Leveling » en anglais) :

Si un bloc quelconque était programmé puis effacé à plusieurs reprise, ce bloc s'userait avant tous les autres, mettant ainsi fin prématurément à la vie du SSD.

Pour éviter ce problème, les contrôleurs des SSD utilisent une technique appelée le Wear Leveling pour répartir les écritures de manière aussi uniforme que possible sur tous les blocs flash du SSD afin qu'aucun ne subisse plus d'écriture que les autres.



Un SSD peut être basé soit sur une mémoire « flash », soit sur une mémoire « volatile ».



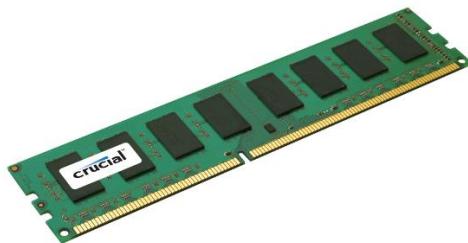
- La mémoire « flash » :

La plupart des fabricants de disques SSD utilisent une mémoire flash NAND en raison du coût faible mais aussi de leur capacité à conserver les données sans alimentation électrique constante. Cela garantit ainsi leur persistance en cas de coupure de courant. Les disques SSD à mémoire flash sont cependant plus lents que les SSD à mémoire volatile.



- La mémoire « volatile » RAM :

Les disques SSD basés sur une mémoire volatile se caractérisent par un accès très rapide aux données (généralement inférieur à 10 microsecondes). Ils sont principalement utilisés pour accélérer les applications qui seraient sinon bloquées par la latence des disques SSD flash ou des disques durs traditionnels.



L'interface hôte est un connecteur physique entre les données contenues dans le SSD et l'ordinateur.



3. Le fonctionnement d'un disque SSD

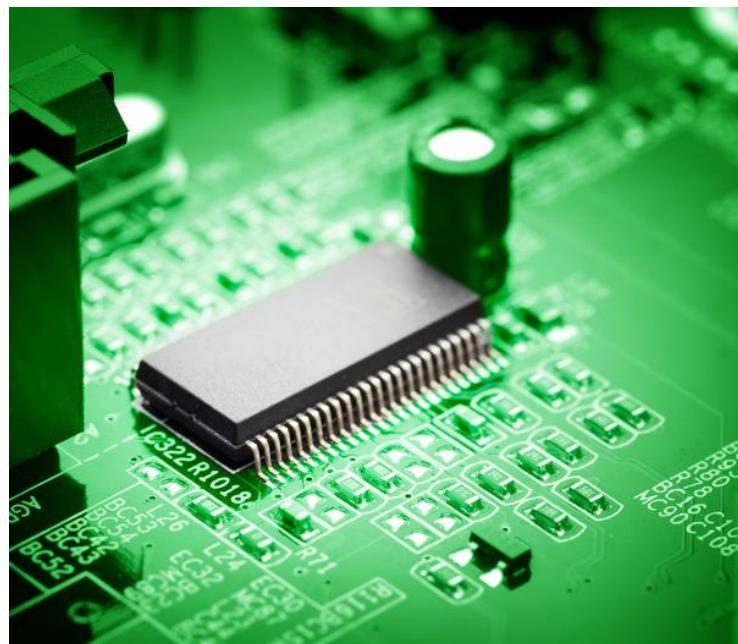
A. Qu'est-ce qu'un semi-conducteur ?

Certains matériaux ne peuvent être considérés ni comme totalement isolants ou ni comme totalement conducteurs, ils sont appelés « semi-conducteurs ». Ils deviennent isolants ou conducteurs en fonction de certaines contraintes, formant ainsi un système binaire de 0 ou 1. Ce changement de caractère est directement lié à la structure atomique de ces matériaux.

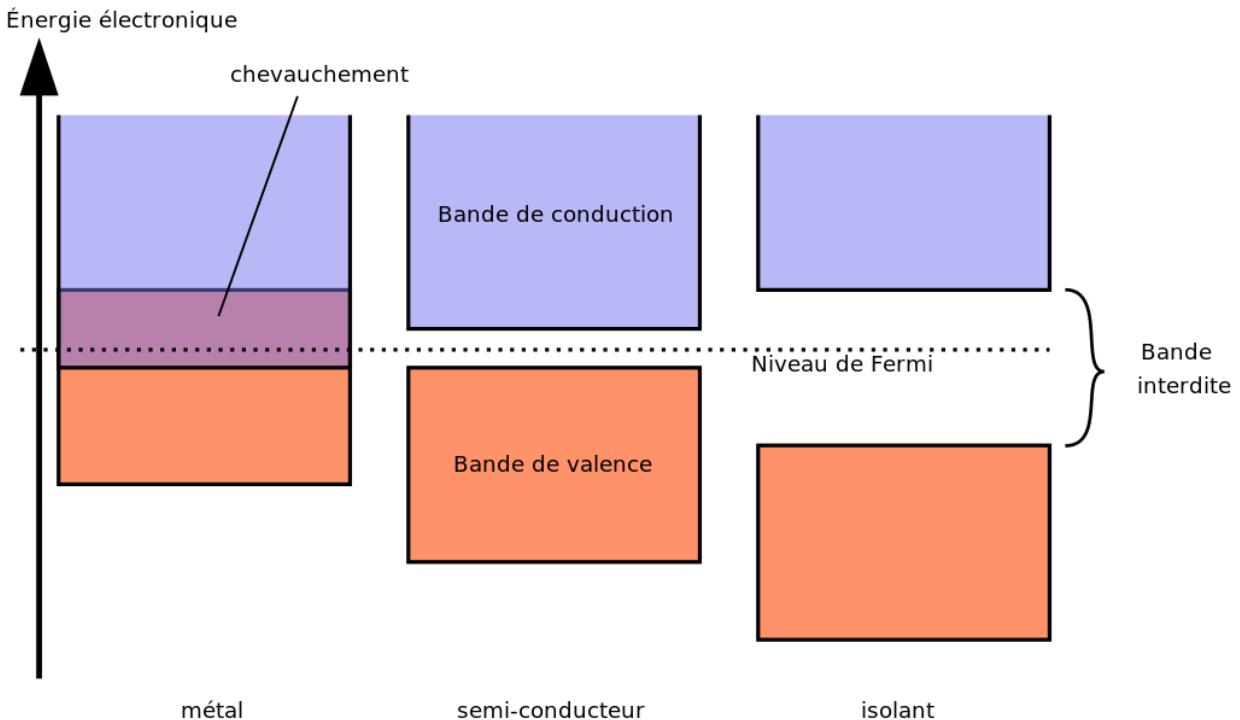
En effet, chaque élément du tableau périodique possède un nombre précis d'électrons qui gravitent autour de leur noyau. Cette organisation électronique est propre à chaque atome et est représentée sous la forme de couches. C'est cet agencement qui est responsable de la conductivité électrique d'un élément.

Ainsi, un atome comporte différents types d'électrons :

- Les électrons de cœur qui sont proches du noyau et n'interagissent pas avec les autres atomes
- Les électrons de valence qui se trouvent dans les couches externes d'un atome et qui permettent de créer des liaisons de covalence pour former des molécules afin de respecter la règle du duet ou de l'octet
- Les électrons de conduction qui sont responsables de la conductivité électrique d'un atome



Sur le schéma ci-dessous sont représentées les couches d'électrons de valence et de conduction :



Chez un métal, des électrons sont présents dans les deux couches (valence et conduction). Cela rend donc le métal conducteur.

En revanche, dans le cas d'un isolant, les deux bandes sont séparées. L'espace les séparant est appelé « bande interdite » puisqu'aucun électron ne peut s'y trouver. Ainsi, tous les électrons se trouvent dans la bande de valence et la bande de conduction reste vide. Le courant ne peut donc pas passer, c'est ce qui donne le caractère isolant de ces éléments.

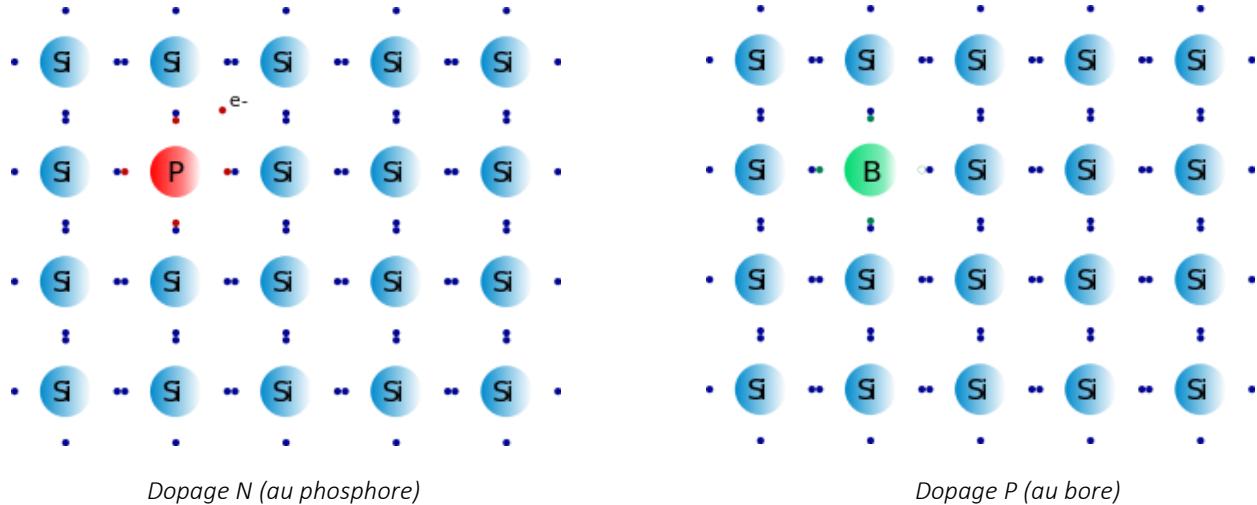
Pour finir, dans un semi-conducteur, la bande interdite est présente mais reste très fine. En excitant les électrons de valence, ils vont passer dans la bande de conduction. Ce transfert rend le semi-conducteur conducteur.

Nous pouvons donc dire qu'un semi-conducteur peut être considéré comme un isolant qui peut devenir conducteur une fois que ses électrons de valence aient été excités.

On peut exciter un électron en le chauffant, en l'éclairant ou en le soumettant à une tension électrique.

Le fait d'ajouter ou de retirer des électrons à un semi-conducteur est appelé « dopage ». Il en existe deux types :

- le dopage N : produire un excès d'électrons → ajouter une charge négative libre
- le dopage P : produire un déficit d'électrons → ajouter une charge positive libre



Le dopage est utilisé afin de modifier certaines propriétés d'un semi-conducteur, tel que sa conductivité électrique. Il est important de garder en tête qu'un semi-conducteur dopé n'est pas chargé : en effet, celui-ci possède toujours autant de protons que d'électrons.

B. Le rôle d'un transistor

Un transistor est un tripôle, c'est-à-dire qu'il contient 3 bornes : le collecteur (input), l'émetteur (output) et la base. Il est fait d'une succession de trois semi-conducteurs dopés Positivement (P) ou Négativement (N). Ainsi, il peut être de la forme « NPN » ou « PNP ». Dans notre exemple, nous utiliserons un transistor NPN car c'est sur celui-ci que sont basés les transistors à porte flottante permettant de stocker des données dans un SSD.

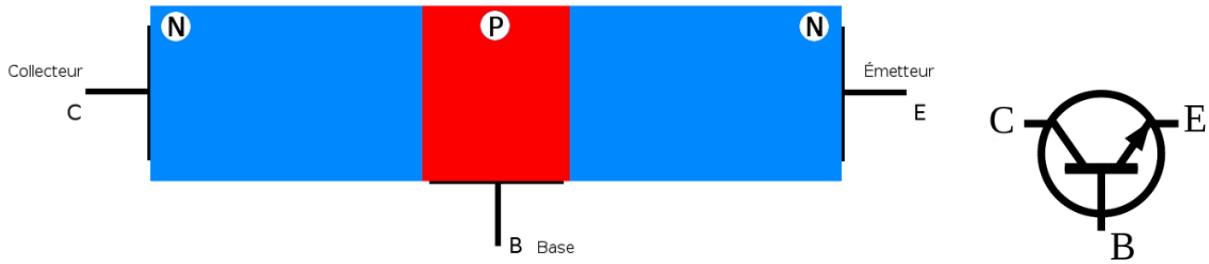
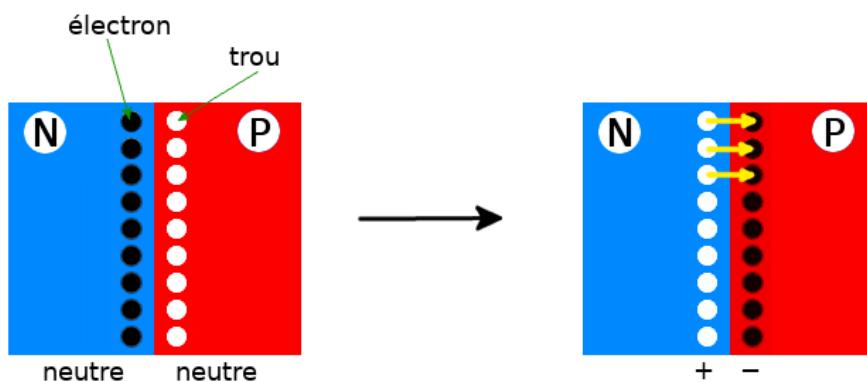


Schéma transistor NPN

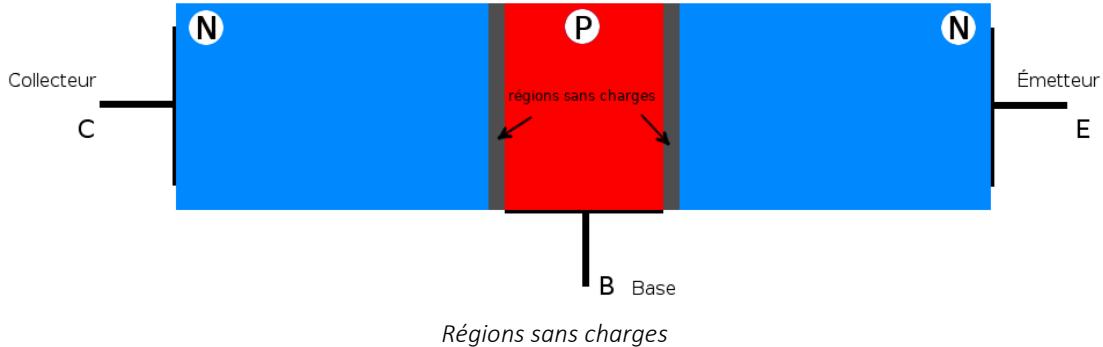
Symbole du transistor NPN

Du fait que les parties dopées N possèdent un excès d'électrons dans leurs structures électroniques, et que les parties dopées P possèdent un déficit d'électrons dans leurs structures, certains électrons de la partie P vont aller « remplir » les trous d'électrons de la partie N aux jonctions entre les deux parties. C'est ce qu'on appelle « la migration électronique ».

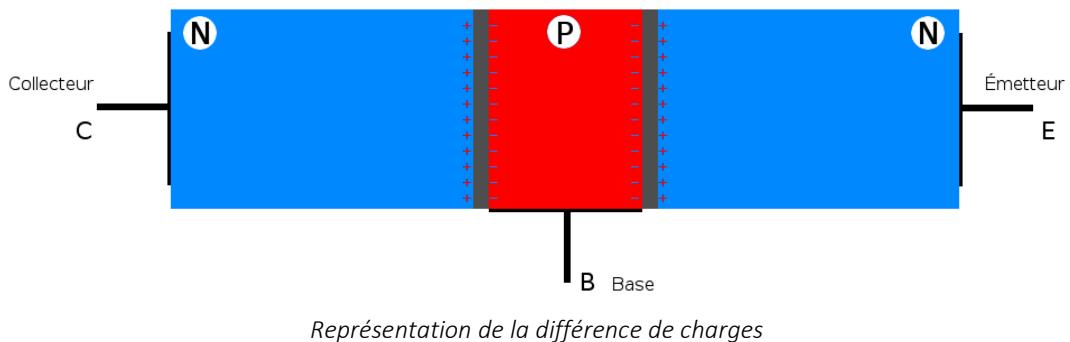


Migration des électrons aux jonctions

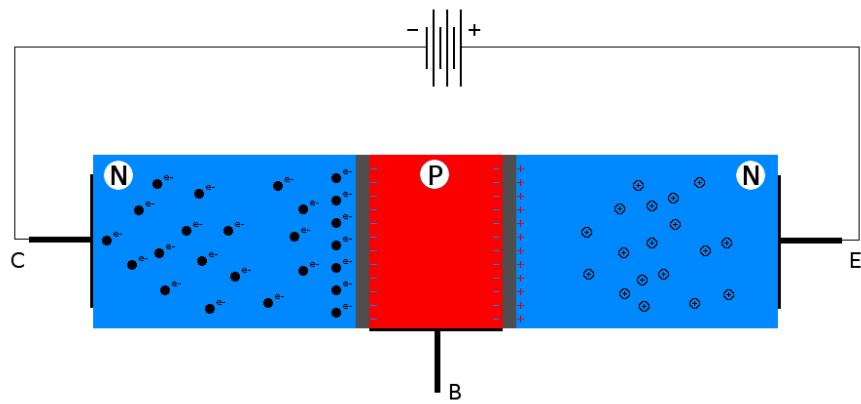
Cela aura pour effet de créer des charges électriques car certains atomes se retrouvent désormais avec un électron en plus ou en moins que leur nombre de protons. Ces zones chargées électriquement vont créer un champ magnétique rendant plus compliqué le voyage d'électron entre les différentes parties. Ces jonctions n'ont donc plus de charges conductrices et deviennent des régions isolantes.



Le déplacement d'électrons va ensuite produire des régions chargées au niveau des jonctions. Les zones N vont devenir positives car les électrons en trop seront partis et les zones P seront négatives car les trous seront bouchés par les électrons. On aura donc une différence de charges.



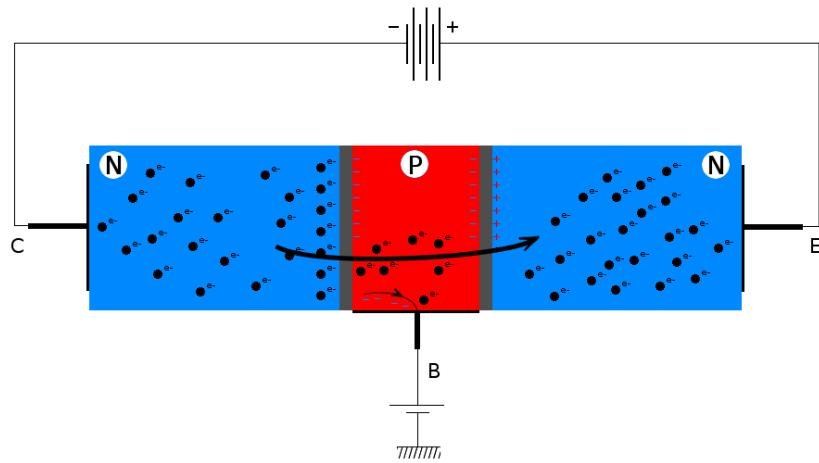
Dans le schéma ci-dessous, nous avons choisi de brancher le transistor en série à un générateur sans alimenter la base. Ce transistor isolera complètement le courant du circuit...



Transistor branché en série

Les électrons vont arriver au Collecteur. Ils seront ensuite attirés naturellement par la région chargée positivement près de la jonction NP. Une fois que des électrons occuperont cette région, ils vont se retrouver devant un mur isolant et la région négative P va les repousser. Les électrons ne passeront donc pas vers l'Émetteur. Quant à eux, les électrons de l'Émetteur vont être attirés dans le circuit en laissant derrière eux des « vides électroniques ». Ce sont des trous chargés positivement à cause du départ des électrons. Dans ce cas, le transistor bloque le courant électrique.

Dans le schéma ci-dessous, nous avons décidé de mettre la base du transistor sous tension. Le courant va ainsi circuler...



Transistor branché en série avec une Base branchée indépendamment

La tension positive de la Base va alors y attirer des électrons. Suite à cela, les électrons du Collecteur ne subissent plus de répulsion et vont désormais circuler librement entre le Collecteur et l'Émetteur. Une fois arrivés à l'Émetteur, les électrons vont boucher les trous positifs et vont finalement pouvoir accéder au circuit.

Pour conclure, nous pouvons dire que la présence de courant sur la Base a supprimé la barrière électronique empêchant le courant de passer entre le Collecteur et l'Émetteur. Si on n'applique pas de courant sur la Base, les électrons arrivants seront bloqués au niveau des trous et vont finir par bloquer le courant.

Notre transistor a donc un comportement très particulier :

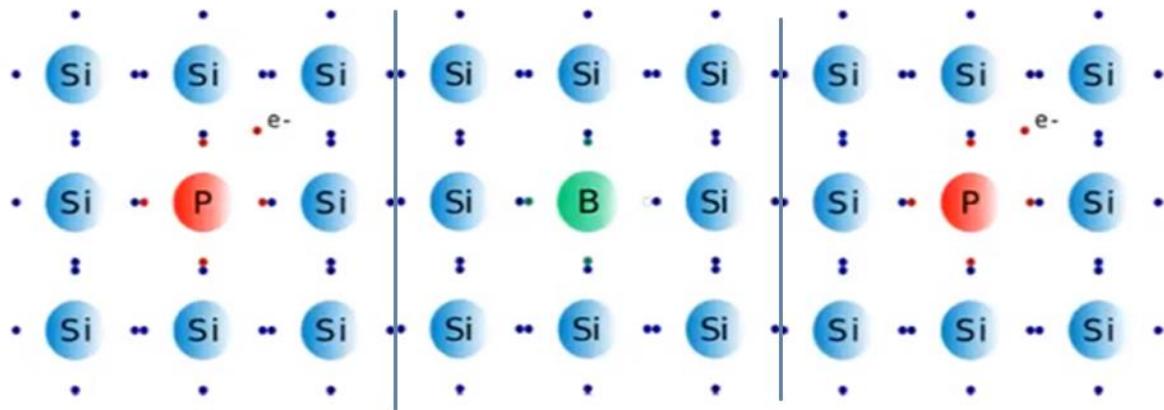
- Si on applique une tension à la base, le transistor est conducteur.
- Si on supprime cette tension, le transistor est isolant.

Cet « effet transistor NPN » permet de contrôler le courant principal avec un petit courant appliqué sur la Base. Nous pouvons donc dire qu'un transistor est un interrupteur contrôlé de manière électronique et sans partie mécanique.

C. Les transistors dans le fonctionnement des SSD

Le fonctionnement de la mémoire du SSD repose sur des moyens électroniques ainsi que sur certains principes quantiques.

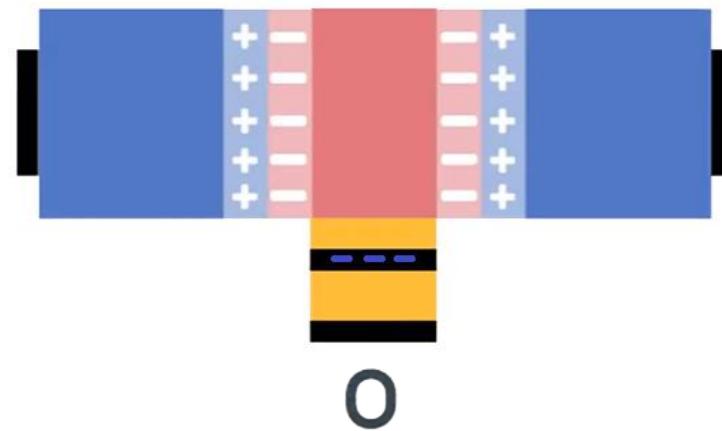
Un transistor est composé de trois cristaux de Silicium dopés et placés en alternance de dopage.



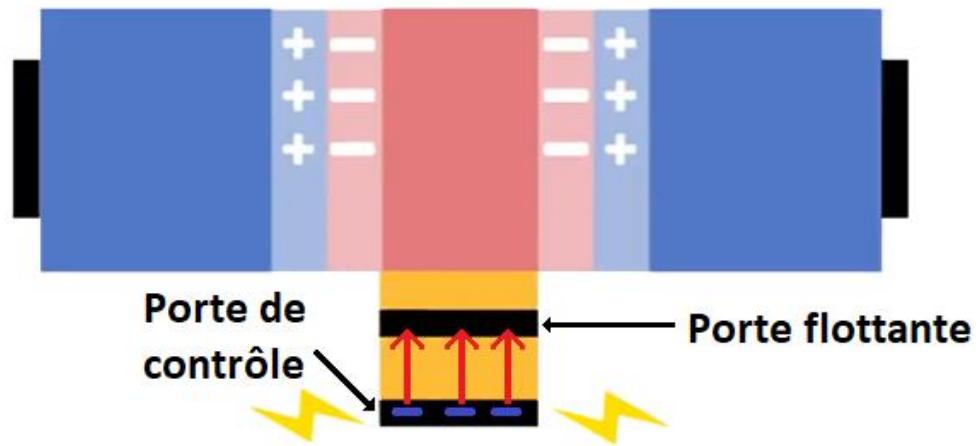
Le fonctionnement de la mémoire du SSD repose sur des moyens électroniques ainsi que sur certains principes quantiques.

Dans un SSD, on utilise un transistor dit « à porte flottante ». C'est exactement le même transistor que celui décrit précédemment à une exception près : il possède au niveau de la base une cellule gardant en mémoire la dernière tension qui lui a été appliquée. Cette cellule est appelée porte flottante.

Nous avons vu précédemment qu'un transistor est un interrupteur contrôlé électroniquement et sans partie mécanique. Pour stocker les données, les SSD utilisent des 0 et des 1. Pour stocker une donnée « 0 », nous allons donc utiliser un transistor dont la porte flottante est chargée négativement

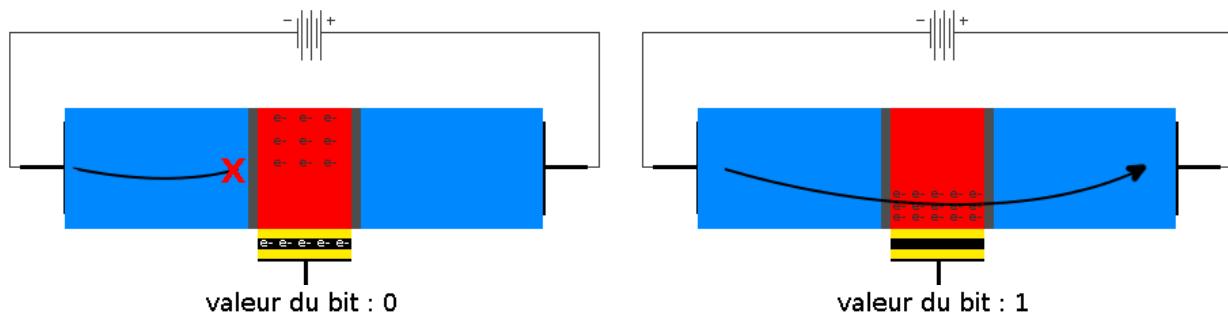


Pour changer la donnée stockée en « 1 », le SSD va alimenter la base du transistor en tension positive. Des électrons vont donc se déplacer de la porte de contrôle à la porte flottante

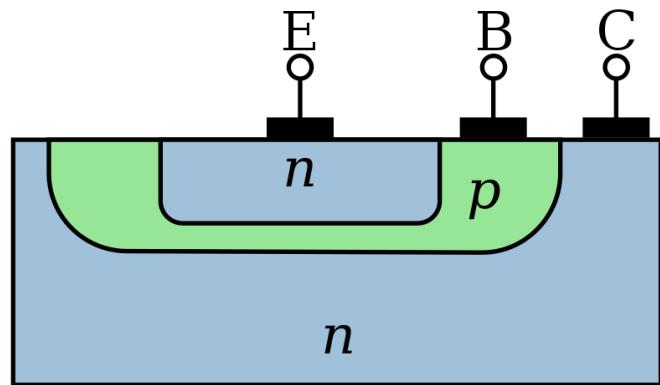


Le courant pourra alors circuler du collecteur jusqu'à l'émetteur. La donnée stockée sera donc « 1 ».

Nous pouvons donc dire que le SSD utilise le système binaire mais de manière électronique : soit le courant ne passe pas car le transistor est isolant (0), soit il passe car il est conducteur (1).



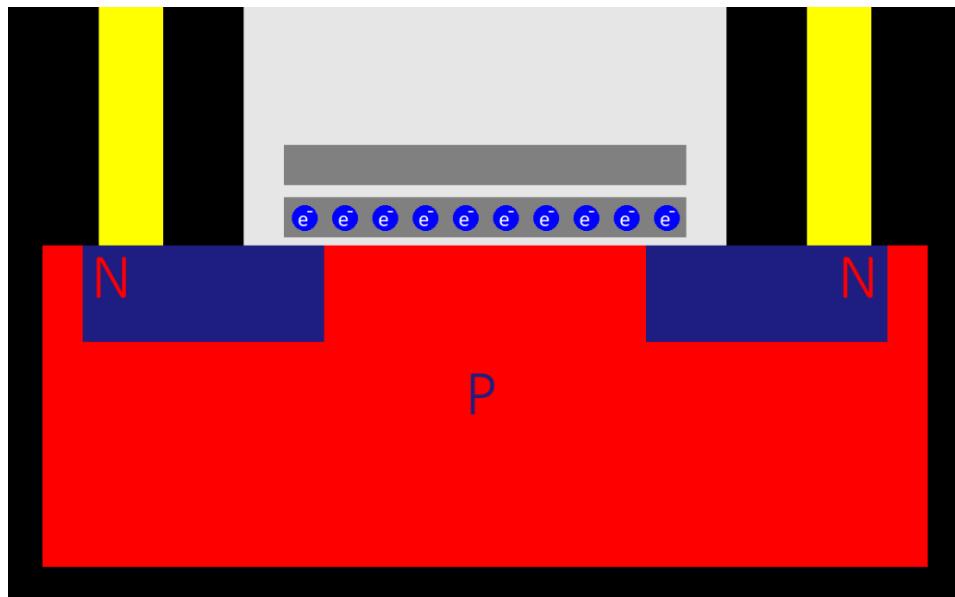
4. Expérience n°3 : Simulation d'un Transistor à l'échelle électronique



A transistor is made up of 3 main parts named collector, base and emitter. In order to get an information, we need to send an electric current through the collector. If a tension is applied to the base, this tension can flow from the collector to the emitter depending on the type of transistor.

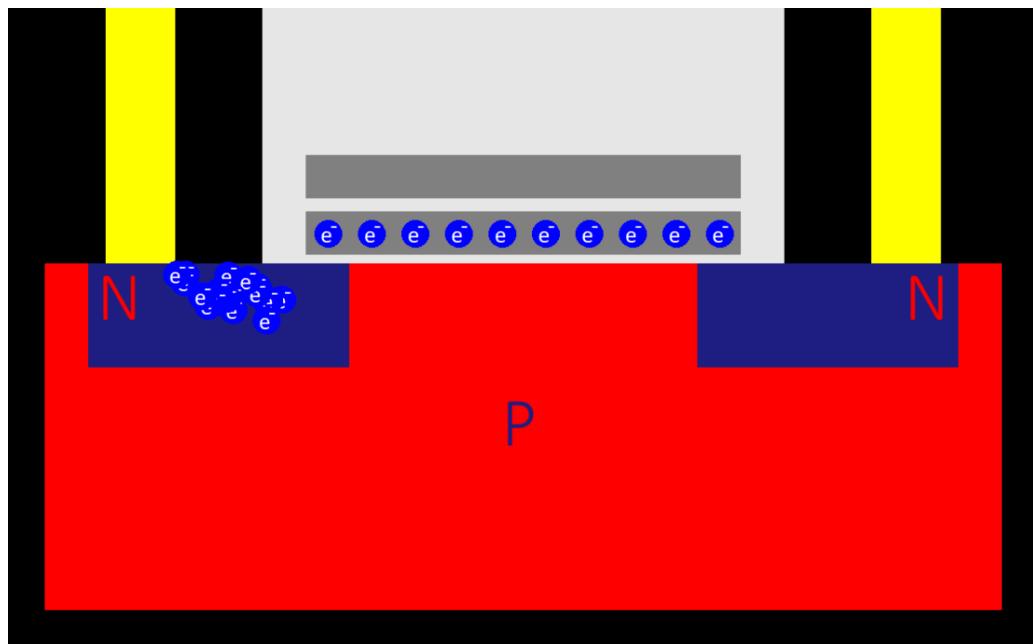
The problem is that if the computer is shut down, the information is lost. To fulfil this problem, we need to store the information. This is done by adding a floating gate to the base. The floating gate is insulating (=isolant) enough to store the charge for several decades. To make it clearer, we have programmed a simulation of a floating gate used in a SSD.

We realized this experiment in order to be as simple as possible. For that, we used the programming language "Python" because we knew how to use it since we did it in math classes. When we launch the simulation, here is what appears:

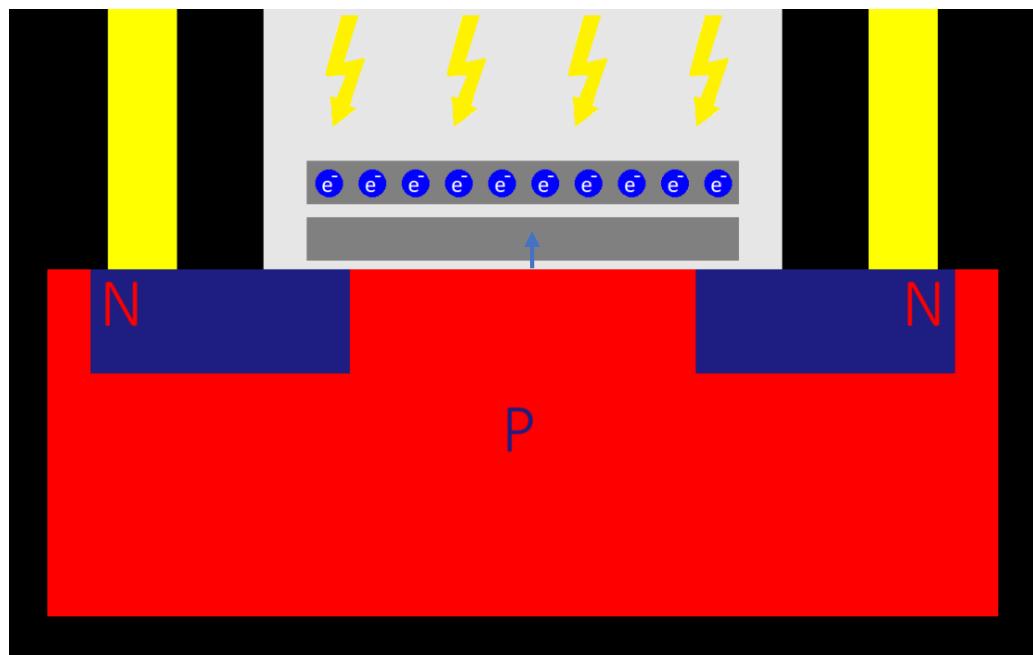


As explained earlier, the base (the gray part at the top) is not filled with electricity and does not attract the electrons that remain attracted by the semiconductor P.

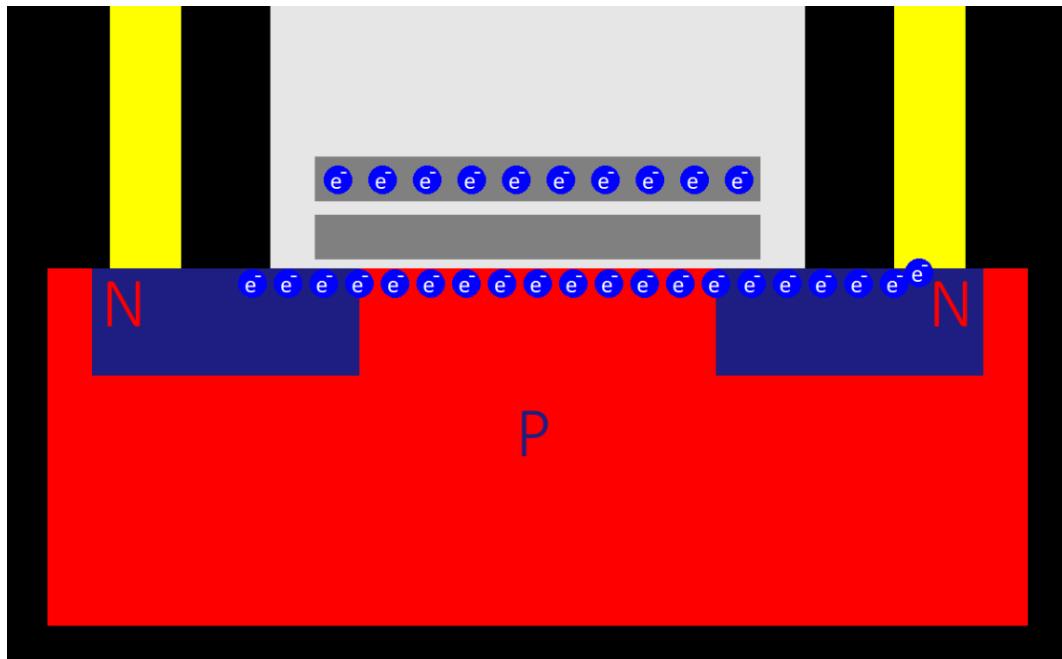
When we press "Enter" on our keyboard, it sends tension and we can see that the electrons remain in the semiconductor N because they are blocked by electrons P. The current does not pass.



On the other hand, if the base is powered by pressing the "up arrow" ("down arrow" button to remove the voltage at the base), the electrons are attracted to that base.



And, when we send voltage, we realize that it can go from one terminal of the transistor to the other. Our transistor is now an electricity conductor thanks to the magnetic field due to the electronical migration.



This experience may seem simple but it took time. Here is its code:

```
1  import sys, pygame, random
2
3  ▼ def aleatoire(x):
4      x-= 300
5      x = 100 - x
6      y = random.random()*x/random.randrange(100, 150)
7      return (round(y))
8
9  ▼ def signe():
10     x = random.randrange(-1, 100000)
11     if x >50005:
12         return -1
13     return 1
14
15 pygame.init()
16 taille = largeur, hauteur = 1200, 750
17 ecran = pygame.display.set_mode(taille)
18
19 BLANC = 255, 255, 255
20 NOIR = 0, 0, 0
21 ROUGE = 255, 0, 0
```

```

22     BLEU = 30, 30, 130
23     GRIS = 128, 128, 128
24     GRIS_CLAIR = 230, 230, 230
25     JAUNE = 255, 255, 0
26
27     cycleI = 0
28     yElectrons = 0
29     animation = 0
30
31     calibri = pygame.font.SysFont("calibri", 80)
32     P = calibri.render("P", 1, BLEU)
33     N = calibri.render("N", 1, ROUGE)
34
35     partieP = pygame.Rect(50, 300, 1100, 400)
36     partieP_Surface = pygame.Surface((1100, 400))
37     partieP_Surface.fill(ROUGE)
38     partieNGauche = pygame.Rect(100, 300, 300, 120)
39     partieNGauche_Surface = pygame.Surface ((300, 120))
40     partieNGauche_Surface.fill(BLEU)
41     partieNDroite = pygame.Rect(800, 300, 300, 80)
42     partieNDroite_Surface = pygame.Surface ((300, 120))
43     partieNDroite_Surface.fill(BLEU)
44     porteFlottante = pygame.Rect(350, 240, 500, 50)
45     porteFlottante_Surface = pygame.Surface((500, 50))
46     porteFlottante_Surface.fill(GRIS)
47     porteControle = pygame.Rect(350, 175, 500, 50)
48     porteControle_Surface = pygame.Surface((500, 50))
49     porteControle_Surface.fill(GRIS)
50     oxydeSilicium = pygame.Rect(300, 0, 600, 300)
51     oxydeSilicium_Surface = pygame.Surface((600, 300))
52     oxydeSilicium_Surface.fill(GRIS_CLAIR)
53     source = pygame.Rect(120, 0, 80, 300)
54     source_Surface = pygame.Surface((80, 300))
55     source_Surface.fill(JAUNE)
56     drain = pygame.Rect(1000, 0, 80, 300)
57     drain_Surface = pygame.Surface((80, 300))
58     drain_Surface.fill(JAUNE)
59
60     electron = pygame.image.load("electron.png")
61     electronRect = electron.get_rect()
62
63     eclair = pygame.image.load("eclair.png")
64     eclair_surface = eclair.get_rect()
65     eclair_surface.top = 10
66
67 ▼ while 1:
68     cycleI += 1
69 ▼     for event in pygame.event.get():
70         if event.type == pygame.QUIT: sys.exit()
71 ▼         if animation == 0 and event.type == pygame.KEYDOWN:

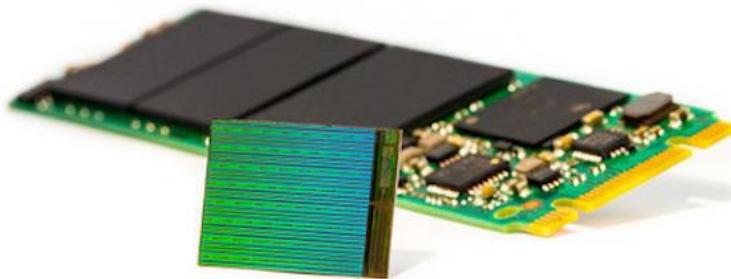
```

```

72         if event.key == pygame.K_DOWN:
73             animation = 1
74         elif event.key == pygame.K_UP:
75             animation = 2
76         elif event.key == pygame.K_RETURN:
77             animation = 3
78         electrons = []
79         for i in range(0, 20):
80             electrons.append(electron.get_rect())
81             electrons[i].left = 160
82             electrons[i].top = -35 - 40*i
83         clock = 0
84
85     if animation == 1 and cycleI %2 == 0:
86         if yElectrons == 65: animation = 0
87         else: yElectrons += 1
88
89     elif animation == 2 and cycleI %2 == 0:
90         if yElectrons == 0: animation = 0
91         else: yElectrons -= 1
92
93     ecran.fill(NOIR)
94     ecran.blit(partieP_Surface, partieP)
95     ecran.blit(partieNGauche_Surface, partieNGauche)
96     ecran.blit(partieNDroite_Surface, partieNDroite)
97     ecran.blit(oxydesilicium_Surface, oxydeSilicium)
98     ecran.blit(porteflottante_Surface, porteFlottante)
99     ecran.blit(porteControle_Surface, porteControle)
100    ecran.blit(source_Surface, source)
101    ecran.blit(drain_Surface, drain)
102    ecran.blit(P, (575, 450))
103    ecran.blit(N, (110, 305))
104    ecran.blit(N, (1038, 305))
105
106
107    if animation == 3:
108        clock += 1
109        for i in range (0, 20):
110            if electrons[i].left < 350 and electrons[i].top < 300:
111                electrons[i] = electrons[i].move([0, 4])
112            elif electrons[i].top >= 300:
113                if electrons[i].left < 1010 and yElectrons == 0:
114                    electrons[i] = electrons[i].move([4, 0])
115                elif electrons[i].left >= 1010:
116                    electrons[i] = electrons[i].move([0, -4])
117                elif electrons[i].left < 400:
118                    a = aleatoire(electrons[i].left)
119                    electrons[i] = electrons[i].move([a,signe()*(4-a)])
120                    if electrons[i].top > 380 : electrons[i] = electrons[i].move([-1, -4])
121                    if (clock == 500) :
122                        animation = 0
123
124            elif electrons[i].left > 500 and electrons[i].top <= 300:
125                electrons[i] = electrons[i].move([0, -4])
126
127
128            ecran.blit(electron, electrons[i])
129            if (clock == 600) :
130                animation = 0
131
132            for i in range(360, 850, 50):
133                electronRect.top = 185 + yElectrons
134                electronRect.left = i
135                ecran.blit(electron, electronRect)
136
137            if animation == 1 or animation == 2:
138                for i in range(350, 900, 150):
139                    eclair_surface.left = i
140                    ecran.blit(eclair, eclair_surface)
141
142    pygame.display.flip()

```

5. Synthèse du SSD



We just saw that, in an SSD, the mechanical part is replaced by NAND flash memory. This allows Solid State Drive to offer many benefits ...

Advantages
Fast flow
Starting and launching quick programs
Quiet
Low energy consumption
Very reliable (=fiable)
Compact and lightweight
No problems with overheating

Unfortunately, it also offers some disadvantages...

Disadvantages
High cost (1 to 1.50 € / GB)
Limited life
Slow operation when deleting files

We can see that the SSD may offer more benefits than the Hard Disk but it's still more expensive and has a limited life. The Hard Disk is limited in its performance while the SSD suffers from economic constraints.

IV / Les formes alternatives



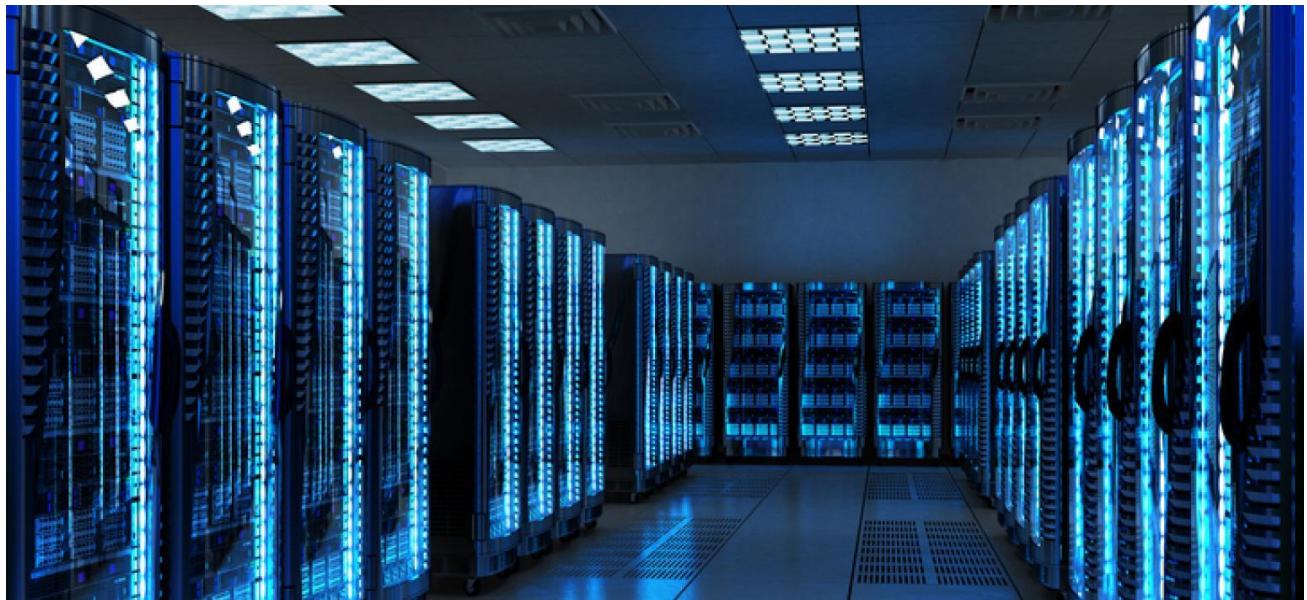
Les Disques Durs et les SSD souffrent tous les deux de problèmes qui s'expliquent par le fait que, à

l'époque de leur invention, la science ne disposait pas d'autant de ressources qu'aujourd'hui.

De ce fait, de plus en plus nouvelles technologies de stockage voient le jour à notre époque, nous les appelons « les formes alternatives » car peu de monde les utilise régulièrement mais elles vont sans nul doute se développer dans les années à venir...

1. Les Data Centers

Un Data Center (centre de données) est chargé de stocker et de distribuer des données. C'est un site physique composé de plusieurs installations informatiques (serveurs, routeurs, disques durs...) à travers un réseau interne ou via un accès Internet.



Les entreprises sont les principales utilisatrices de centres de données car elles ont besoin d'une grosse quantité de stockage et d'un rapide traitement des données. Plusieurs choix sont à leur disposition, soit l'utilisation d'un Data Center directement relié à l'entreprise soit la location d'une salle, un étage ou un bâtiment spécialement conçu à cet effet.



Par ailleurs, des grosses entreprises telles que Google ou Facebook possèdent plusieurs bâtiments qui y sont dédiés.

L'inconvénient majeur des Data Centers est que cela demande beaucoup d'électricité. Pour diminuer cet impact environnemental, certains Data Centers sont utilisés par des sociétés mais sont localisés dans des endroits totalement différents de leur utilisation habituelle. Pour l'anecdote, certains Data Centers sont situés près des centres aquatiques et sont utilisés non seulement pour stocker des données mais également pour chauffer les piscines grâce à la température dégagée...



Data Center de Google



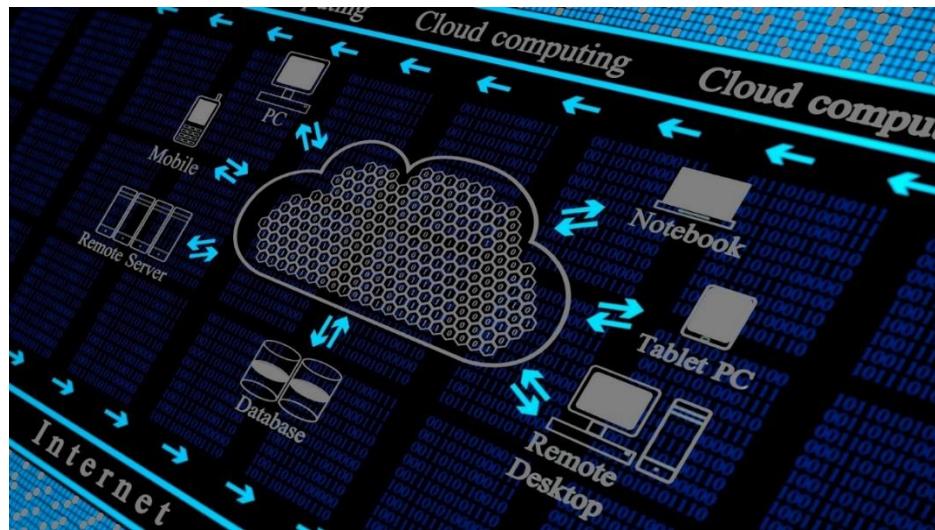
Data Center de Facebook

Pour finir, les particuliers eux-aussi peuvent également utiliser les Data Centers à une plus petite échelle. En effet, les données que l'on met dans un « Cloud » sont stockés physiquement puis reliées par internet aux appareils personnels.

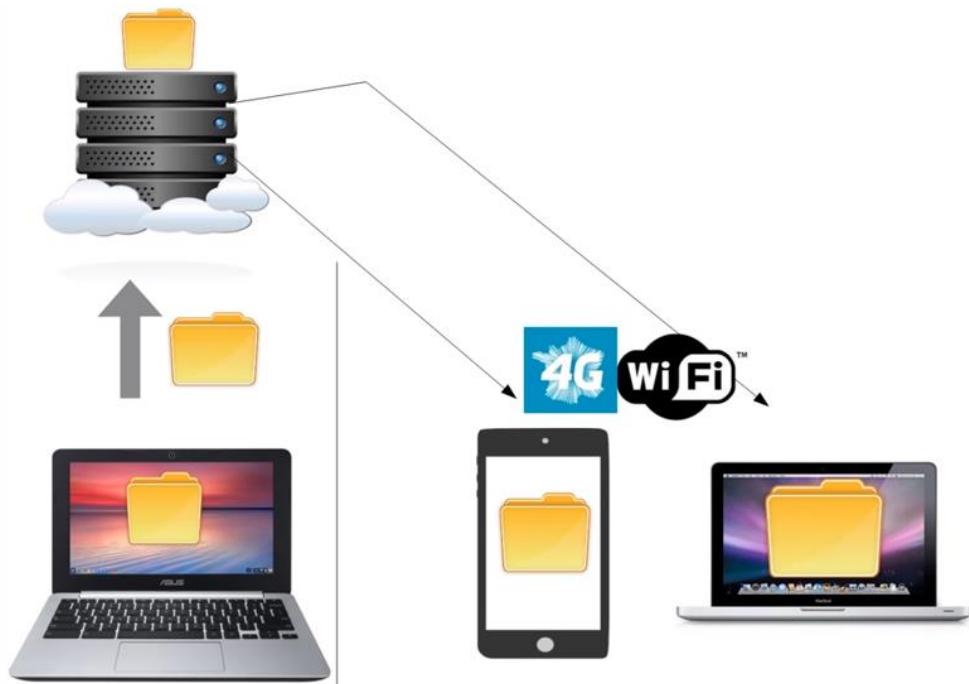


2. Le Cloud

Le Cloud est un terme dont on entend parler de plus en plus à notre époque. Selon Wikipédia : « *Le Cloud est un modèle permettant un accès omniprésent, pratique et à la demande à un réseau partagé et à un ensemble de ressources informatiques configurables comme des réseaux, des serveurs, du stockage, des applications et du service qui peuvent être provisionnées et libérées avec un minimum d'administration.* »



Cette phrase incompréhensible et barbare est pourtant très facile à comprendre une fois que l'on a bien saisi tous les termes. Pour cela, nous avons décidé d'utiliser un schéma :



Explication du schéma : Vous avez votre ordinateur personnel qui comporte vos fichiers. Vous allez ensuite envoyer votre fichier sur le Cloud. Celui-ci va alors stocker ce fichier sur un autre ordinateur appartenant à une entreprise appelée dans ce contexte « un hébergeur » (Google Drive, Dropbox, iCloud, OneDrive mais aussi YouTube et Netflix...). Vous allez donc mettre en ligne votre fichier et il va atterrir chez l'hébergeur. Avec seulement un accès à Internet, vous aurez accès à tous vos fichiers depuis n'importe quel appareil.

Pour utiliser librement un Cloud, il existe néanmoins certaines conditions :

Conditions
avoir souscrit sur le site de l'hébergeur (payant)
disposer d'une connexion performante (accès Internet au lieu du HDD/SSD)

Une fois ces conditions remplies, vous pourrez profiter des nombreux avantages qu'offre le Cloud :

Avantages
Cloud sécurisé (fichiers cryptés)
Partage des données entre collègues (nous avons utilisé Google Drive pour ce TPE)
Accès aux données de n'importe où sans avoir sa clé USB ou son Disque Dur externe
Aucun engagement financier (abonnements à la demande)

Néanmoins, il possède un inconvénient majeur :

Inconvénients
il n'est pas inviolable et comporte, comme partout, des failles de sécurité

3. Le stockage ADN



Tout le monde sait ce qu'est l'ADN mais peu de personnes ont conscience du fait que l'on peut stocker des données informatiques à l'intérieur de celui-ci. En effet, l'idée de stocker des informations sur de l'ADN est très sérieusement évoquée comme un éventuel futur moyen de stockage par la communauté scientifique.



A titre d'exemple, il ne faut qu'un picogramme d'ADN pour stocker un livre de 500 pages (soit 1 millionième de millionième de gramme)

Pour coder de l'information sur de l'ADN, il faut utiliser des données en quaternaire. L'ADN possède 4 bases azotées (Thymine, Cytosine, Adénine, Guanine) qui, une fois encodées, seront synthétisées afin que les données traversent plusieurs millions d'années.



Seulement, avec notre technologie actuelle, utiliser une telle technique présente des risques d'erreurs très conséquents. C'est pour cela que des scientifiques travaillent encore sur cette méthode. Elle devient néanmoins de plus en plus abordable et certains géants du Net se penchent sur cette forme de stockage pour passer de grands Data Centers à de petites boîtes d'ADN pouvant tenir dans la main.

V / Conclusion

We will conclude on the storage of information but first, we need to summarize all that has been seen before on Mechanical Hard Disks and SSD. For this, we have realized the table below :

	MECHANICAL HARD DISK	SSD
Operation	Turntables and Magnetic Stripe Read / Write Heads -> ELECTROMAGNETIC	Data storage in electronic memory components (transistors) -> ELECTRONICS
Access Time	2.9 to 12 ms	0.1 ms
Read/Write Speed	12 to 260 MB/s	27 MB/s to 3 GB/s
Noise	Existing because of the displacement of the reading heads	Almost None
Vulnerabilities	Shocks, vibrations, magnetic fields (our first experiment)	Sensitive to the number of writing cycles (wear leveling)
Mass	100 to 650 g	10 to 30 g
Lifetime	Unlimited life as long as there are no shocks	About 5 years according to the builders
Maximum storage capacity	12 TB	30 TB

Despite some issues such as a limited lifetime, SSDs outperform Hard Drives in many areas. For example, they offer greater comfort and easier transportation. Its higher price can be a brake for some individuals wishing to acquire it but it remains a widespread technology in companies with large budget.

However, even though it's growing enormously at the moment, the SSD doesn't satisfy everyone. This is why other forms such as Cloud or DNA Storage have been created and are currently under development.

Initially, we wondered about the available ways for us to store and access our data quickly. Now, our researches allow us to say that a good alternative would be to have a Hard Disk but also a SSD, while experimenting the Cloud for example.

The Hard Disk would be used for mass storage of videos, photos or movies while the SSD will contain software or programs of the computer as the Operating System (Windows, MacOS, Linux). Indeed, the ignition (=allumage) time of a computer is inversely proportional to the speed of the storage device on which it is installed. In other words, if Windows is installed on an SSD, the computer will turn on faster than with a conventional Hard Disk.



Finally, we chose to remind that the world of computing continues to evolve. As a result, the amount of data itself is constantly growing and leads to a sharp increase in storage demand. This is why engineers and scientists are complementary, as are Physics, Mathematics and Engineering Sciences. Their role is to analyze the need and offer solutions. Today, the main ones are Hard Drives, SSDs, Clouds and maybe DNA Storage.

However, these solutions may be very innovative, disadvantages persist and this is why we can ask what would be the ultimate technology that would store our data, access quickly but also to preserve them from the time. We do not have the answer today and can only make assumptions about it. On the other hand, researchers are working right now and they're trying to discover this technology, and that's what makes computing so exciting.



Map of Internet connexions

VI / Remerciements

Nous remercions tout d'abord M. Moréale et M. Cornier de nous avoir encadré durant la réalisation de ce TPE. Leurs conseils nous ont aidé à progresser et leur apport de connaissances nous a permis d'approfondir certains sujets.

Nous tenons également à remercier le Lycée Charles de Gaulle d'avoir mis à disposition le CDI ainsi que du matériel Arduino dans les salles de SI, sans quoi nous n'aurions pas réussi le montage de notre robot.

VII / Glossaire et Sources

Dans cette partie, vous trouverez un glossaire définissant certains termes employés dans notre dossier ainsi que la liste des sources utilisées dans la réalisation de ce TPE.

Glossaire

ATOME : Les atomes sont les constituants élémentaires de toutes les substances solides, liquides ou gazeuses.

BANDE INTERDITE : La bande interdite sépare les bandes de valence et de conduction dans un semi-conducteur.

BIT : Le bit est une unité ne pouvant prendre que deux valeurs, désignées le plus souvent par les chiffres 0 et 1.

CACHE : C'est une mémoire qui enregistre temporairement des copies de données afin d'en diminuer le temps d'accès.

CLOUD : Le Cloud consiste à exploiter la puissance de stockage de serveurs informatiques distants par l'intermédiaire d'un réseau.

DATA CENTER : Un centre de données est un lieu regroupant des équipements constitutifs du système d'information d'une ou plusieurs entreprises.

DISQUE DUR (HARD DISK DRIVE / HDD) : Un disque dur est une mémoire de masse à disque tournant magnétique utilisée dans les ordinateurs.

DONNEE INFORMATIQUE : Une donnée est la représentation d'une information dans un programme. Cela peut être soit dans le texte du programme (code source), soit en mémoire durant l'exécution.

DOPAGE : Le dopage est l'action d'ajouter des impuretés en petites quantités à une substance pure afin de modifier ses propriétés de conductivité.

ELECTRON : L'électron est l'un des composants de l'atome avec les neutrons et les protons. C'est une particule élémentaire qui possède une charge négative.

INFORMATIQUE : L'informatique est un domaine d'activité scientifique concernant le traitement automatique de l'information par l'exécution de programmes informatiques par des machines : des systèmes embarqués, des ordinateurs, des robots ou des automates.

INTERNET : Internet est le réseau informatique mondial accessible à plusieurs milliards de personnes.

MEMOIRE FLASH : La mémoire flash est une mémoire de masse à semi-conducteurs réinscriptible, c'est-à-dire une mémoire possédant les caractéristiques d'une mémoire vive mais dont les données ne disparaissent pas lors d'une mise hors tension.

MEMOIRE VOLATILE : La mémoire volatile est une mémoire informatique qui a besoin d'alimentation électrique continue pour conserver l'information qui y est enregistrée. Lorsque l'alimentation électrique est interrompue, l'information contenue dans la mémoire volatile est quasiment immédiatement perdue.

NEUTRON : Le neutron est une particule subatomique de charge électrique nulle.

NIVEAU DE FERMI : Le niveau de Fermi est une caractéristique propre à un système qui traduit la répartition des électrons dans ce système en fonction de la température. La notion de niveau de Fermi est utilisée en physique et en électronique, notamment dans le cadre du développement des composants semi-conducteurs.

NIVELLEMENT D'USURE : Le nivelllement d'usure est une technique utilisée avec les mémoires flash, qui vise à prolonger la durée de vie d'un support de stockage non-volatile en répartissant uniformément le nombre d'écritures et d'effacements sur toutes les cellules de stockage.

OCTET : Un octet est un multiplet de 8 bits codant une information. Dans ce système de codage, s'appuyant sur le système binaire, un octet permet de représenter 28 nombres, soit 256 valeurs différentes.

PROTON : Le proton est une particule subatomique portant une charge élémentaire positive.

SALLE BLANCHE : Une salle blanche est une pièce où la concentration particulaire est maîtrisée afin de minimiser l'introduction, la génération, la rétention de particules à l'intérieur, généralement dans un but spécifique industriel ou de recherche scientifique. Dans notre cas, c'est pour éviter que des particules ne se déposent à la surface du Disque Dur.

SEMI-CONDUCTEUR : Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante.

SOLID STATE DRIVE (SSD) : Un solid-state drive, abrégé en SSD, est un matériel informatique permettant le stockage de données sur de la mémoire flash.

STOCKAGE DE MASSE : L'objectif du stockage de masse est de stocker une grande quantité d'informations à long terme.

SYSTEME BINAIRE : Le système binaire est le système de numération utilisant la base 2 (un 0 ou un 1).

TRANSISTOR : Le transistor est un composant électronique qui est utilisé dans la plupart des circuits électroniques. C'est un interrupteur électroniquement contrôlé.



Sources de nos recherches

<http://le.disque.dur.free.fr/fonctio/composants.html>

<http://users.skynet.be/fa804967/etude1.pdf>

<https://couleur-science.eu>

<http://www.le-grenier-informatique.fr/pages/documents/histoire-des-disques-durs.html>

<https://searchstorage.techtarget.com/definition/bad-block>

<https://www.journaldunet.com/solutions/expert/68947>

<https://www.lesnumeriques.com/duels-batailles-produits-stars-a966/hdd-vs-ssd-ap677.html>

<https://www.lesnumeriques.com/ssd/ssd-tout-savoir-tout-comprendre-a1630.html>

<https://www.sciencesetavenir.fr/high-tech/informatique>

https://www.wikiwand.com/en/Binary_number

[https://www.wikiwand.com/en/Cache_\(computing\)](https://www.wikiwand.com/en/Cache_(computing))

<https://www.wikiwand.com/en/Cleanroom>

https://www.wikiwand.com/en/Cloud_computing

https://www.wikiwand.com/en/Computer_science

[https://www.wikiwand.com/en/Data_\(computing\)](https://www.wikiwand.com/en/Data_(computing))

[https://www.wikiwand.com/en/Doping_\(semiconductor\)](https://www.wikiwand.com/en/Doping_(semiconductor))

https://www.wikiwand.com/en/Electronic_band_structure

https://www.wikiwand.com/en/Fermi_level

https://www.wikiwand.com/en/Flash_memory

https://www.wikiwand.com/en/Hard_disk_drive

[https://www.wikiwand.com/en/Octet_\(computing\)](https://www.wikiwand.com/en/Octet_(computing))

<https://www.wikiwand.com/en/Semiconductor>

https://www.wikiwand.com/en/Solid-state_drive

<https://www.wikiwand.com/en/Transistor>

https://www.wikiwand.com/en/Volatile_memory

https://www.wikiwand.com/en/Wear_leveling

<https://www.youtube.com/watch?v=RwbIMBSr8o8>

https://www.youtube.com/watch?v=wOb_OdK-i68

<https://www.wired.com/story/the-rise-of-dna-data-storage/>

<https://www.alphr.com/features/386074/out-of-disk-space-storage-options-for-your-media>

<https://www.quora.com/What-are-some-alternative-forms-of-storage-besides-hard-disk-drives-and-solid-state-drives-that-is-forms-of-storage-that-came-after-these>

Références des images et sources

Formes anciennes de stockage : Pinterest - The Prehistoric Art

Nouvelles formes : Blogspot - Historique de l'Ordinateur

Courbe de vente HDD vs SSD : Statista - Ventes HDD et SSD

Disque Dur 1 : Futura-Sciences - Disque Dur

RAMAC 305 d'IBM 1 : ContentCD - Ramac-305

HP-7900A : ArraidLLC - HP-7900A

IBM AT 5170 : VintageCPU - IBM AT 5170

Courbe PC : Science et Vie - Ordinateurs personnels

Courbe Web : Science et Vie - Connexion Internet

Plateaux : LCD - Disque Dur et ses plateaux

Piste et Secteur : Kiteb - Piste et Secteur d'un Disque Dur

Cylindres : Furuta-Sciences - Cylindres d'un Disque Dur

Tête de Lecture : MyScienceWork

Premier SSD : GrosBill - SATA 3 120 Go

SSD Moderne : Les Numériques - SanDisk SSD + 240 Go

SSD Nand : ComputerWorld - Mémoire flash

Data Center Google : Data Center de Google, à Oklahoma

Data Center Facebook : Data Center de Facebook, en Caroline du Nord

<https://oac.cdlib.org/ark:/13030/kt2d5nf0z6/?brand=oac4>

https://en.wikipedia.org/wiki/IBM_305_RAMAC

<https://www.science-et-vie.com/archives>

<https://www.numelion.com/evolution-du-e-commerce.html>

<http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2013/SSD/rappel.html>

<https://www.futura-sciences.com/tech/dossiers/informatique-stockage-donnees-informatiques-105/page/3/>

<https://www.mysciencework.com/omniscience/disques-durs-des-tetes-de-lecture-a-oscillateurs-magnetiques>

<https://www.bbc.com/news/technology-33675734>

<https://couleur-science.eu/?d=775902--comment-fonctionne-un-transistor>

https://en.wikipedia.org/wiki/Bipolar_junction_transistor

<https://geneticliteracyproject.org/2017/11/29/much-data-store-can-dna-solve-problem/>