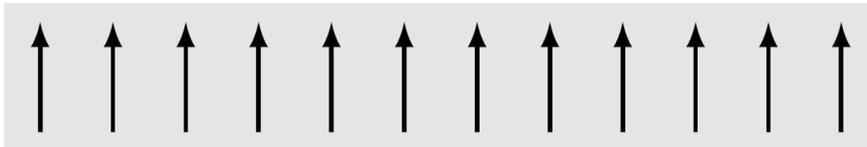


Le ferromagnétisme, l'antiferromagnétisme et le ferrimagnétisme

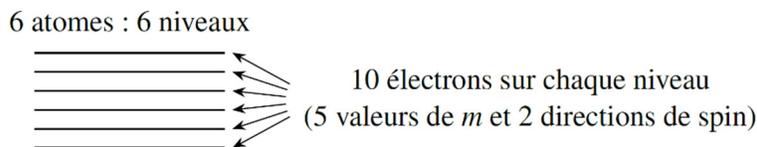
Le ferromagnétisme

Dans certaines substances, les atomes se lient de sorte que les moments magnétiques de chaque atome doivent avoir une orientation particulière. Par exemple, il arrive que les moments dipolaires s'orientent dans la même direction.

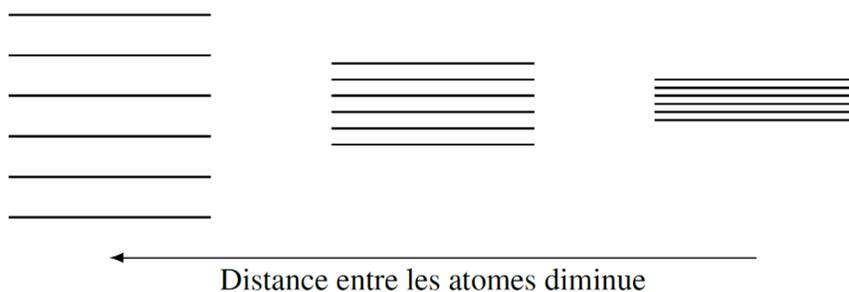


Dans ce cas, les moments magnétiques vont tous s'additionner et la substance aura un moment magnétique très important. Ce sont les substances ferromagnétiques. Il n'y a que cinq éléments ferromagnétiques : le fer, le nickel, le cobalt, le gadolinium et le dysprosium.

Cet alignement a une cause vraiment particulière. Ce n'est pas le champ fait par les atomes voisins qui force les atomes à s'orienter ainsi, car sinon, cet alignement se produirait pour tous les éléments paramagnétiques. Pour comprendre pourquoi il y a cet alignement, il faut savoir ce qui se passe quand des atomes partagent des électrons. Dans le cas des éléments de transitions, ce sont les orbitales 3d de tous les atomes qui fusionnent pour former une nouvelle orbitale. Dans cette nouvelle orbitale, il y a de nombreux niveaux atomiques. En fait, le nombre du niveau d'énergie est égal au nombre d'atomes. S'il y a 6 atomes, il y a 6 niveaux d'énergie dans l'orbitale et chacun de ces niveaux peut contenir 10 électrons (puisque'il y a 5 valeurs de m et 2 valeurs de s par niveau).



De plus, l'écart d'énergie entre les niveaux augmente à mesure qu'on approche les atomes les uns des autres. Voici donc les niveaux d'énergie avec 6 atomes.



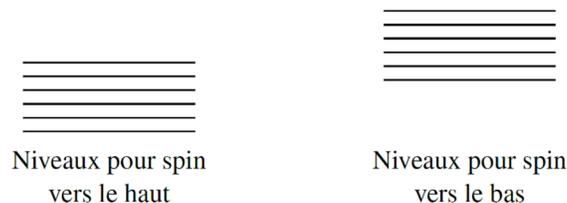
On va séparer ces niveaux en deux parties : les niveaux d'énergie quand le spin est vers le haut et les niveaux quand le spin est vers le bas. Chaque niveau pourra alors contenir 5 électrons. Quand les atomes sont loin les uns des autres, il n'y a pas beaucoup de différence d'énergie selon la direction du spin.



Si on examine bien, les niveaux du spin vers le haut sont un peu plus bas que ceux du spin vers le bas. (J'ai choisi arbitrairement ceux des spins vers le haut. En fait, ce pourrait être n'importe lequel des deux.) Les énergies diffèrent à cause du principe d'exclusion de Pauli. Les électrons ayant des spins dans la même direction doivent être plus éloignés les uns des autres, ce qui diminue l'énergie potentielle électrique. Quand ils ont des spins dans des directions opposées, ils peuvent être plus près et donc avoir une plus grande énergie potentielle. Il est donc avantageux de mettre initialement des électrons avec des spins tous dans la même direction avant d'en mettre avec des spins opposés.

Comme les électrons occupent toujours les niveaux d'énergie les plus bas, ils vont remplir le 1^{er} niveau des spins vers le haut, puis ensuite le 1^{er} niveau des spins vers le bas, puis le 2^e niveau des spins vers le haut, puis le 2^e niveau des spins vers le bas, et ainsi de suite. En alternant ainsi entre les niveaux de spins vers le haut et vers le bas, les moments magnétiques de spins vont s'annuler et il n'y aura pas de moment magnétique très important pour une telle substance.

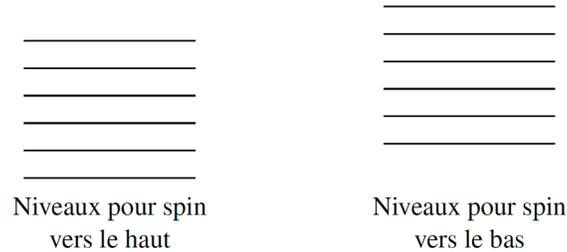
Si les atomes sont un peu plus près les uns des autres, les énergies des niveaux changent. On pourrait alors avoir la situation suivante.



L'écart entre les niveaux augmente et les niveaux du spin vers le haut décalent davantage vers le bas par rapport à ceux des spins vers le bas. Ce décalage augmente parce que la densité d'électrons augmente en approchant les atomes. Il est alors très avantageux de garder les électrons plus loin les uns des autres en leur donnant des spins dans la même direction (ils doivent rester loin en vertu du principe d'exclusion de Pauli).

On va donc remplir plusieurs niveaux avec des spins dans la même direction avant de commencer à annuler ces spins avec des électrons ayant des spins dans l'autre direction. Il y a donc beaucoup d'électrons avec des spins dans la même direction, ce qui donne un moment magnétique important à la substance. Elle est alors ferromagnétique.

Si les atomes sont encore plus près, on aura la situation suivante.

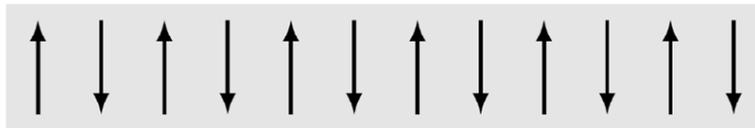


Il y a encore cette différence d'énergie à cause du principe d'exclusion de Pauli, mais elle devient moins importante par rapport à la séparation des niveaux d'énergie qu'il y a parce que les atomes sont près les uns des autres. En remplissant les niveaux d'énergie en choisissant toujours les plus bas possible, on va remplir peu de niveaux avec un spin dans une direction avant d'en ajouter avec spins dans l'autre direction. Les moments magnétiques de spin pourront alors s'annuler et la substance n'aura pas un moment magnétique important.

On voit ainsi que pour qu'une substance soit ferromagnétique, il faut que la distance entre les atomes soit correcte et il faut qu'il y ait suffisamment d'électrons pour bien remplir les niveaux d'énergie avec le spin vers le haut, mais pas trop pour ne pas les annuler avec des électrons ayant des spins vers le bas. Ce sont des conditions un peu particulières qui ne sont remplies que pour quelques éléments, dont le fer et le nickel.

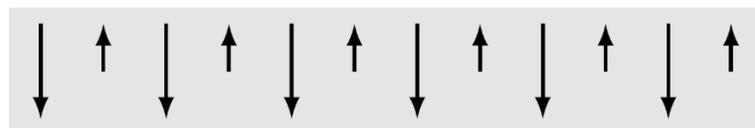
L'antiferromagnétisme et le ferrimagnétisme

Dans certaines substances, l'interaction entre les atomes fait que les moments dipolaires doivent plutôt alterner d'un atome à l'autre.



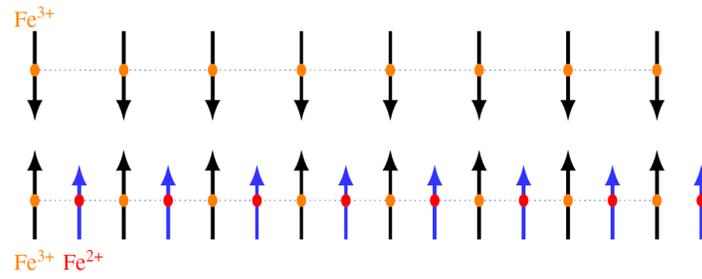
De toute évidence, cette substance ne pourra pas avoir de moment magnétique, même si chaque atome a un moment magnétique important. Ce sont les substances antiferromagnétiques. Le chrome est une substance antiferromagnétique.

Parfois, on peut avoir des atomes ayant des moments magnétiques qui alternent, mais avec des moments magnétiques de grandeurs différentes.



Dans ce cas, il y aura aussi un moment magnétique. Les substances qui ont un moment magnétique net parce qu'une telle annulation incomplète se produit sont appelées *ferrimagnétiques*.

C'est le cas de la magnétite (Fe_3O_4), dans laquelle les ions ferreux Fe^{2+} s'alignent dans la même direction et des ions ferriques Fe^{3+} alternent et s'annulent.



Les atomes dans une substance ferrimagnétique forment aussi des domaines qui se modifient en présence de champ magnétique externe.