

Colloque G.N. Lewis

8 Mars 2024

Du modèle de Lewis au modèle électromagnétique unificateur de description des liaisons chimiques : une analyse didactique et épistémologique.

Julien VALENTIN

Docteur en didactique de la chimie – UBO

Professeur de physique-chimie en CPGE BCPST



Plan de la présentation

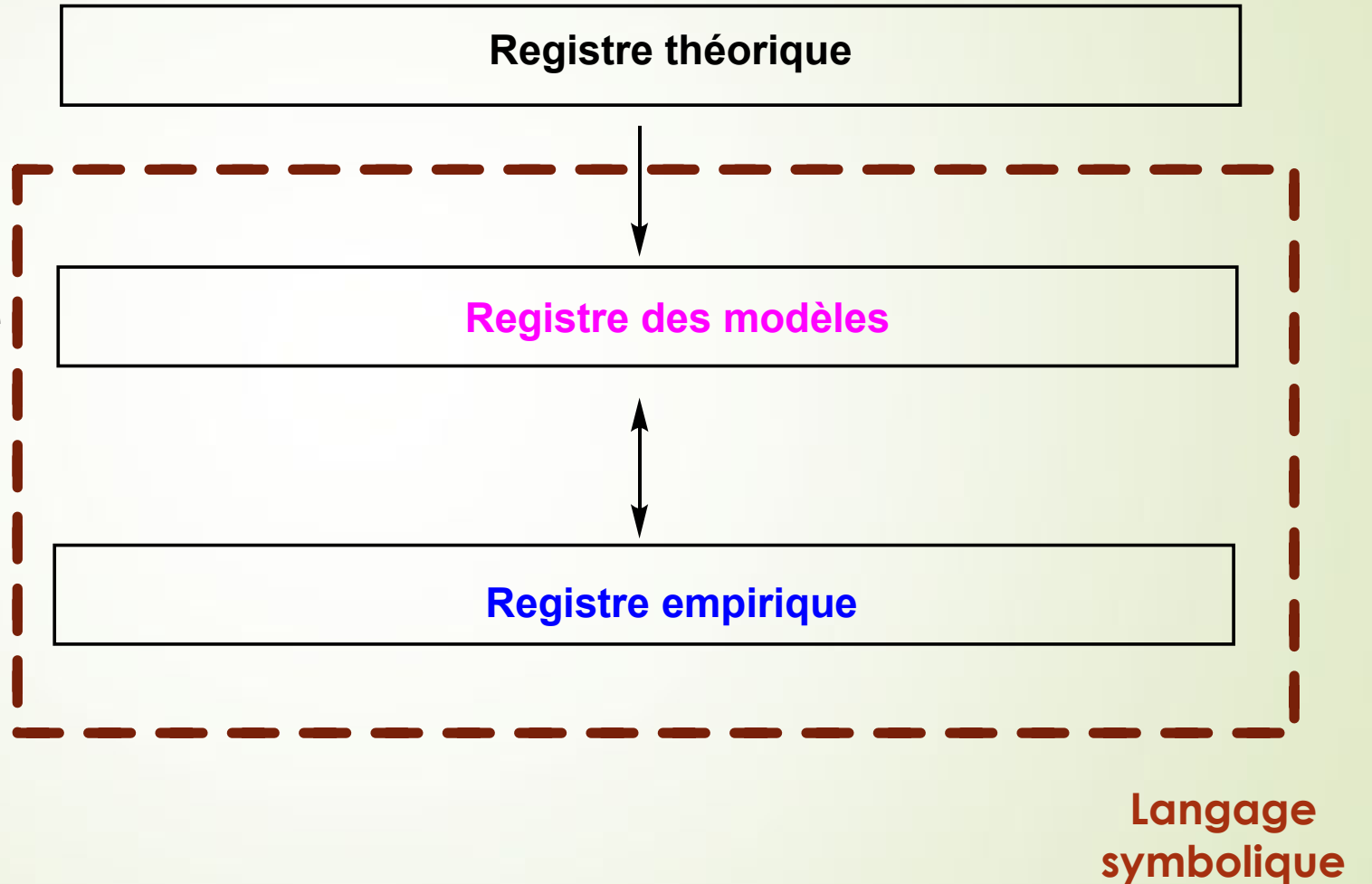
- **Préambule : cadre d'analyse du savoir en chimie**
- **La genèse du modèle de Lewis**
 - Pourquoi Lewis a-t-il proposé un modèle ?
 - Description du modèle de Lewis originel (1916)
 - Description du modèle de Lewis de 1923
 - Description du modèle de Lewis actuel
- **Les difficultés recensées des élèves et des étudiants**
- **Quelques recommandations pour l'enseignement**
- **Ouverture : modèle électromagnétique unificateur de description des liaisons chimiques**

3

Analyse du savoir en chimie

Kermen (2016)

Rôle de médiation
entre le registre théorique
et le registre empirique



Genèse du modèle de Lewis (1)

Contexte au début du XX^e siècle

- Connaissance de l'existence de l'électron (Thomson, 1897)
- Recherche de la structure atomique, par les physiciens et chimistes, pour **expliquer et interpréter** des **résultats expérimentaux** (Lewis, 1916)

Des objectifs différents ...

Physiciens → interprétation et explication des spectres de raies

Chimistes → interprétation et explication de la **structure moléculaire, de la périodicité des propriétés des éléments dans le tableau périodique et des transformations chimiques.**

Genèse du modèle de Lewis (2)

- Classification dualistique des substances (polaires et non polaires)
- Explication de la cohésion des substances polaires : transfert partiel ou total d'électrons mobiles entre atomes.

“The essential difference between the polar and the nonpolar molecule is that, in the former, one or more electron are held by sufficiently weak constraints so that they may become separated from their former position in the atom, and in the extreme case pass altogether to another atom, thus producing in the molecule a bipole or multipole of high electric moment. Thus in an extremely polar molecule, such as that of sodium chloride, it is probable that at least in the great majority of molecules, the chlorine atom has acquired a unite negative charge and therefore the sodium atome a unit positive charge, and that the process of ionization consists only in a further separation of these charged parts. (...) In the polar molecule the electrons, being more mobile (than in the nonpolar molecule), move as to separate the molecule into positive and negative parts.” (Lewis, 1916, p. 764)

Genèse du modèle de Lewis (3)

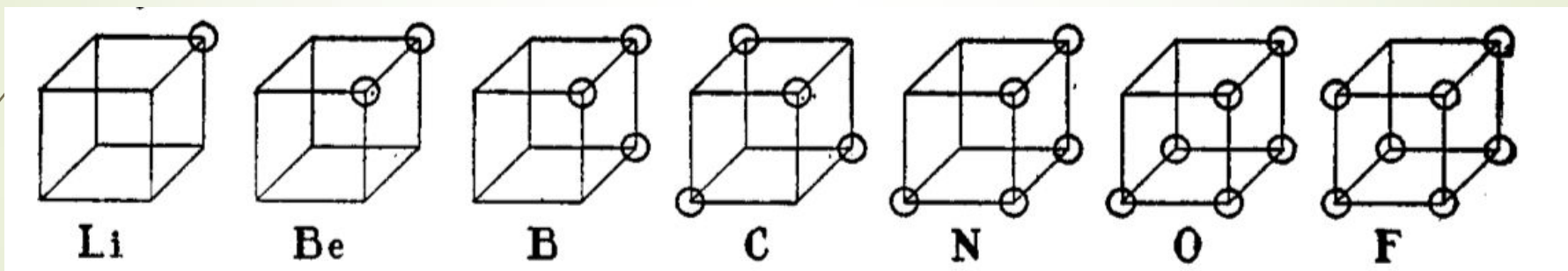
- Ambition de Lewis : proposer un **modèle unificateur** pour :
 - décrire toutes les substances (polaires et apolaires)
 - Rendre compte du **continuum** entre les substances polaires et apolaires

” (...) scanning the whole field of phenomena (polar and nonpolar molecules) we are, I believe, forced to the conclusion that the distinction between the most extreme polar and nonpolar types is only one of degree, and that a single molecule, or even part of molecule, may pass from one extreme to another, not by a sudden and discontinuous change, but by imperceptible gradations” (Lewis, 1916, p. 767)

7

Modèle de Lewis originel (1) – publication de 1916

- **Communication du modèle à l'aide de la langue naturelle et de représentations.**
- Un atome d'un élément donné est représenté par un **cube**.
- Seuls les **électrons de valence** sont représentés → omission du **kernel**



Représentation des électrons de la couche externe des atomes des éléments de la deuxième période du tableau de la classification périodique (Lewis, 1916, p. 767)

- Mention de **forces électriques** pour expliquer la structure cubique :
 - Attractives entre noyaux et électrons
 - Répulsives entre électrons

Modèle de Lewis originel (2) – publication de 1916

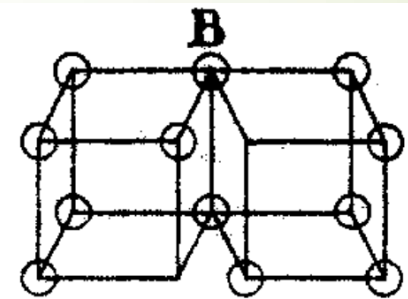
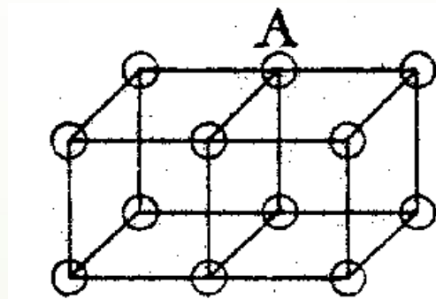
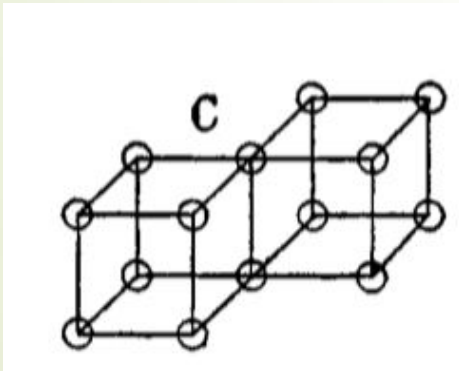
- Cohésion des molécules interprétées à l'aide de **forces électromagnétiques entre « corps »**

Now there are only two ways in which one body can be held by another. It may, owing to a **force of attraction**, be drawn toward the second body until this force is gradually offset by a more rapidly increasing **force of repulsion**. In this case it comes to rest at a point where the **net attraction or repulsion is zero**, and is therefore in a condition of constraint with respect to any motion along the line joining the **two centers**; for if the **distance** between the two bodies is diminished they repel one another, while if the distance is increased they are attracted toward one another" (Lewis, 1916, p. 772).

- Intuition de Lewis au regard de **l'inertie chimique de l'Hélium** : un ensemble de deux électrons forme une paire stable.
- Absence d'appuis théoriques (modèle *ante* mécanique quantique)

Modèle de Lewis originel (3) – publication de 1916

- Selon Lewis (1916), une molécule diatomique résulte d'une **association de deux cubes**.
- Cette dernière est possible grâce à (au moins) une **paire d'électrons commune** aux deux cubes (« rule of two ») + **règle des « huit »**
- **Absence du verbe « to share »** dans la publication de 1916.



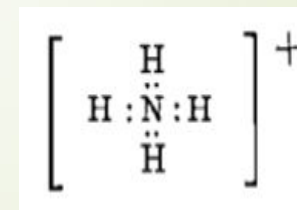
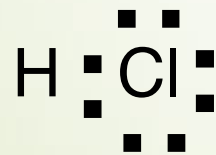
Une représentation de la molécule de diiode (C) et deux représentations de la molécule de dioxygène (A et B) dans le cadre du modèle cubique (Lewis, 1916, p. 775-778)

Modèle de Lewis originel (4) – publication de 1923

- Forces électromagnétiques entre particules mentionnées ;
- Évolution **des représentations des molécules** ...

“In my first theory of the atom I represented the normal group of eight electrons by a cube with an electron at each corner, but the idea that electrons are coupled leads rather to the view that the stable octet is to be represented rather as a tetrahedron with a pair of electrons at each corner” (Lewis, 1923, p. 81)

Cube (1916) → Tétraèdre (1923) → Représentations bidimensionnelles



Représentations de molécules selon Lewis (Lewis, 1923, p. 82, 87 & 89)

Modèle de Lewis originel (5) – publication de 1923

- **Mention du verbe « to share »** dans la publication de 1923.

“Hydrogen may form hydrogen ion with no electrons, it may form hybride ion by adding one electron and thus completing the stable pair, or finally two hydrogen atoms may unite to form hydrogen molecule, in which **each atom shares** with the other this stable pair of electrons.” (Lewis, 1923, p. 80)

- Multiples **formulations anthropomorphiques**
- **La règle des huit devient la règle de l’octet** attribuée à Langmuir.
- Point fort des publications de Lewis : **explication de toute la structure de la matière à l’échelle submicroscopique ; nombreuses références au registre empirique**

Modèle de Lewis dans les ouvrages actuels (1)

Centration du contenu des ouvrages sur :

► La définition d'une liaison covalente

- Une liaison chimique covalente résulte de la mise en commun de deux électrons de valence entre deux atomes d'éléments donnés

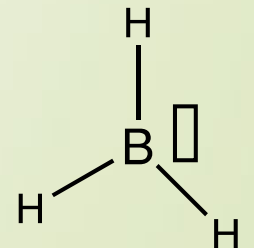
► La règle de l'octet et de ses limites

- Des **procédures** variées pour écrire des schémas de Lewis de molécules incluant l'introduction de concepts de mécanique quantique (configurations électronique, vocabulaire ...)

► Représentations

- Liaison covalente représentée par un tiret ou deux points entre les symboles de noyaux des atomes d'éléments considérés
- Les charges formelles sont encerclées
- Lacune électronique représentant une orbitale moléculaire vacante :

création pédagogique ?



Modèle de Lewis dans les ouvrages actuels (2)

Généralement, sur la base d'une analyse d'ouvrages de 1^{er} CU :

- **Absence du rôle des noyaux** d'atomes des éléments considérés
- Les **forces électromagnétiques** attractives et répulsives ne sont **pas mentionnées**
 - Lorsque les forces attractives sont mentionnées, la **répulsion n'est pas (ou rarement) évoquée** **Problème ?**
- Peu ou pas de références aux représentations du modèle originel
- Absence de référence au registre empirique.

Ouvrage	Définitions collectées d'une liaison covalente dans les différents ouvrages
O1	« la liaison covalente, ou liaison par électrons partagés <u>est assurée par un doublet d'électrons commun aux deux atomes</u> » (p 117).
O2	« La liaison covalente est due à un <u>échange permanent</u> d'électrons mis en commun entre deux atomes » (p 53) « Les liaisons sont faites par le recouvrement ou le mélange d'orbitales atomiques avec mise en commun d'électrons, deux en général. » (p 55).
O3	« Dans une liaison covalente <u>les électrons sont partagés par les atomes</u> » (p 130) « Lewis a trouvé que <u>les atomes d'une molécule peuvent obéir à la règle de l'octet en mettant en commun des électrons</u> . Les électrons sont toujours partagés par paires » p 133
O4	« Une liaison covalente <u>est un doublet d'électrons partagé entre deux atomes</u> » (p 76)
O5	« Lewis émit l'hypothèse d'une autre sorte de liaison chimique dans laquelle <u>deux atomes se partagent une paire d'électrons</u> » (p 197) ; « la liaison qui se forme <u>entre deux atomes grâce à une paire d'électrons mise en commun</u> est appelée liaison covalente ». p 198
O6	« Le <u>recouvrement de deux orbitales atomiques</u> forme une liaison covalente. Dans une liaison covalente simple, <u>deux électrons (c'est-à-dire un doublet) sont partagés entre deux atomes</u> » (p 289)
O7	« la liaison chimique <u>est due à un partage d'électrons entre atomes</u> ». (p. 159).

Conclusion modèle de Lewis

- **Premier modèle** de liaison chimique abordé au lycée et à l'université ;
- Modèle « papier/crayon » ne **nécessitant aucun calcul**
- Son **ubiquité** dans les **ouvrages** et **programmes** traduit son **importance** dans l'enseignement de la chimie.



Modèle a été transformé au cours de l'histoire par :

- Lewis lui-même
- les auteurs d'ouvrages

Les difficultés connues des élèves et des étudiants (1)



- Centration sur des **procédures** et des **algorithmes**
- Focalisation sur les **représentations** de liaisons } Levy-Nahum et al. (2010)
- **Absence d'interprétation** physique d'une liaison }
- Explications anthropomorphiques et téléologiques } Taber et Watts (1996)
- Centration sur le modèle et difficultés à faire des liens avec le registre empirique. } Levy-Nahum et al. (2007, 2010)

Les difficultés connues des élèves et des étudiants (2)

➤ Le trait représentant la liaison covalente :

➤ véhicule une idée de **proximité spatiale des électrons** mis en commun (Kermen, 2020)

➤ Évoque un **lien matériel** entre les atomes (Le Maréchal et Cross, 2010 ; Syahrial et al., 2023)

« [...] Par ce terme (de liaison) **je n'entends pas propager l'idée d'une quelconque jonction matérielle**, les liaisons en effet qui maintiennent les atomes d'un composé étant probablement plus semblables à celles qui relient les membres du système solaire. »
Frankland cité par Dumon et Cokelez (2006, p. 53).

“**A line is simply a way of representing the concept of bond**, because a bond is the word that chemists use to express the idea that two atoms are held strongly by a constraining force, but of course, a bond has no physical reality” (Gillespie & Robinson, 2006, p. 88)

Les difficultés connues des élèves et des étudiants (3)

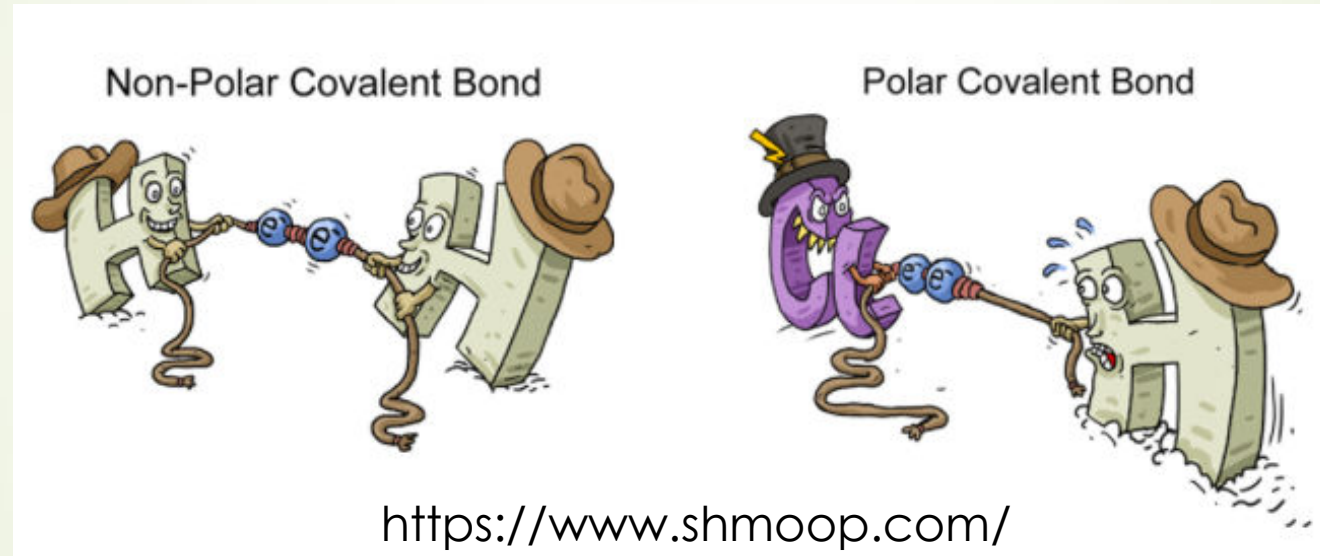
- Le trait représentant la liaison covalente :
 - Donne une idée **statique** de la liaison chimique covalente (Zohar & Levy, 2019)

Cette représentation ne rend pas compte du **mouvement perpétuel** des particules, ni des **forces électromagnétiques** qui se compensent en moyenne entre ces mêmes particules;

- Lorsque l'attraction électrons – noyaux est mentionnée par les élèves et étudiants, la répulsion ne l'est pas ou bien l'attraction l'emporte sur la répulsion (Zohar & Levy, 2019) → **Problème !**
- **Ce trait rend compte néanmoins de la forte densité électronique entre les noyaux considérés** (Entretien avec P. Chaquin)

Les difficultés connues des élèves et des étudiants (4)

Des images trompeuses glanées sur le net et parfois utilisées par des enseignants sous couvert d'introduction de touches d'humour dans leur cours



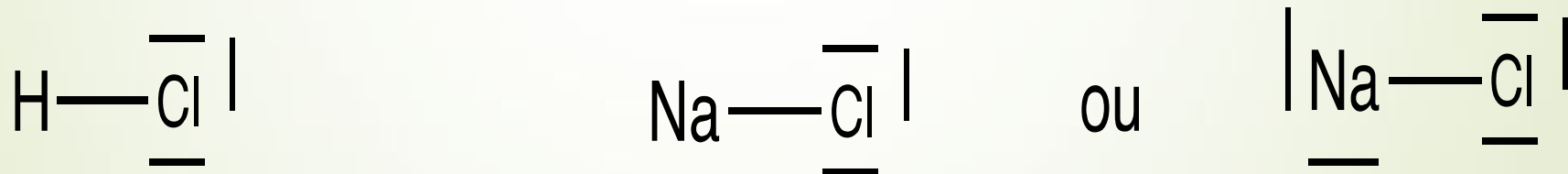
→ Cela entretient les difficultés et la mécompréhension des élèves et étudiants

Les difficultés connues des élèves et des étudiants (5)

- Les élèves et étudiants cherchent à **représenter toute liaison chimique par un trait** entre symboles de noyaux d'atomes.

Ces mécompréhensions sont notamment générées par les formules brutes qui ne permettent pas de distinguer la liaison ionique de la liaison covalente.

HCl (chlorure d'hydrogène) vs NaCl (Chlorure de sodium) ?



Diverses représentations proposées par des élèves de lycée (Cokelez & Dumon, 2005, p. 1021)

Modèle de Lewis : des pistes pour améliorer la compréhension des élèves et étudiants.

- Introduire le modèle de Lewis en faisant référence au **modèle originel** et aux **contraintes empiriques** qui ont servi à son élaboration (Simões, 2007)
- Mentionner les **interactions électromagnétiques** (électrostatiques) attractives et répulsives entre particules (noyaux et électrons) (Levy Nahum et al, 2007, 2010)
- Renforcer le **statut explicatif** de la règle de l'octet
- Introduire la **représentation d'une liaison** (si elle existe) en distinguant explicitement le symbole de l'objet et en privilégiant un vocabulaire adapté (Kermen, 2022)
- **Initier et former les enseignants (secondaire et supérieur) à la didactique de la chimie pour faire évoluer leurs pratiques**

Vers un modèle unificateur des liaisons chimiques ?

- Les chimistes et enseignants de chimie distinguent **divers types de liaisons chimiques et plusieurs modèles** pour décrire et expliquer des propriétés particulières de la matière
 - Laisse l'impression aux élèves et étudiants de principes physiques différents en nature pour chaque liaison chimique (Nahum et al, 2013)
- Structuration des ouvrages et des programmes : découpage en chapitres par type de liaison chimique.
 - Idée des philosophes des Lumières : la chronologie historique influence l'organisation pédagogique des connaissances (de Hosson, 2004)

Une unification est souhaitable à l'université !

Vers un modèle unificateur des liaisons chimiques ?

Analyse constituée à partir d'ouvrages de 2^{ème} cycle universitaire

Divers types de liaisons chimiques (covalente, ionique, de Van der Waals, hydrogène et métallique).

Même principe physique pour décrire chacune d'entre elles :

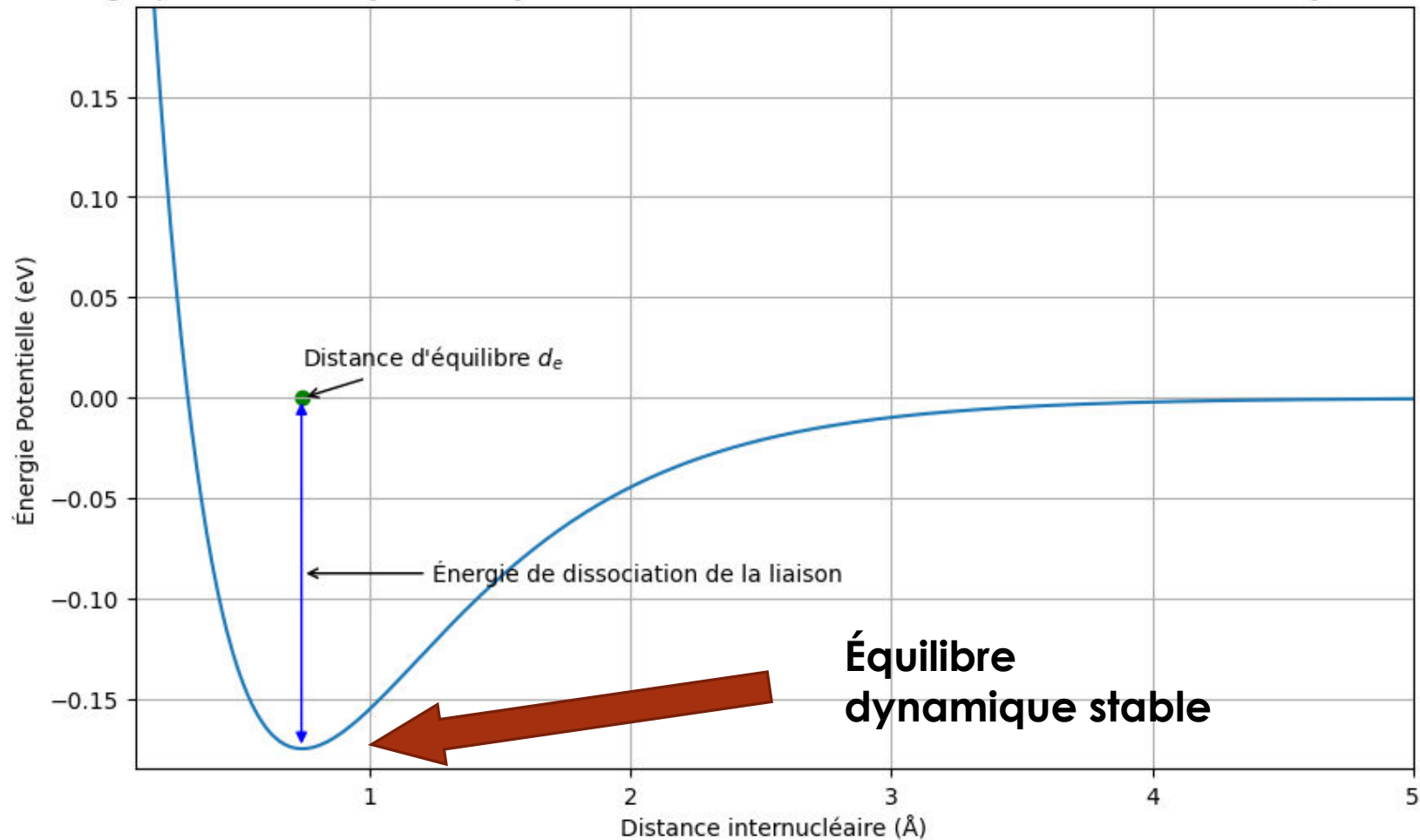
- **Interactions** entre particules mobiles (noyaux et électrons)
- Attractives et répulsives
- Interprétées comme des **forces électromagnétiques**
- **Caractéristiques** d'une liaison chimique :
 - **distance** internucléaire moyenne constante
 - **énergie** moyenne de dissociation

Continuum
entre les types
de liaisons

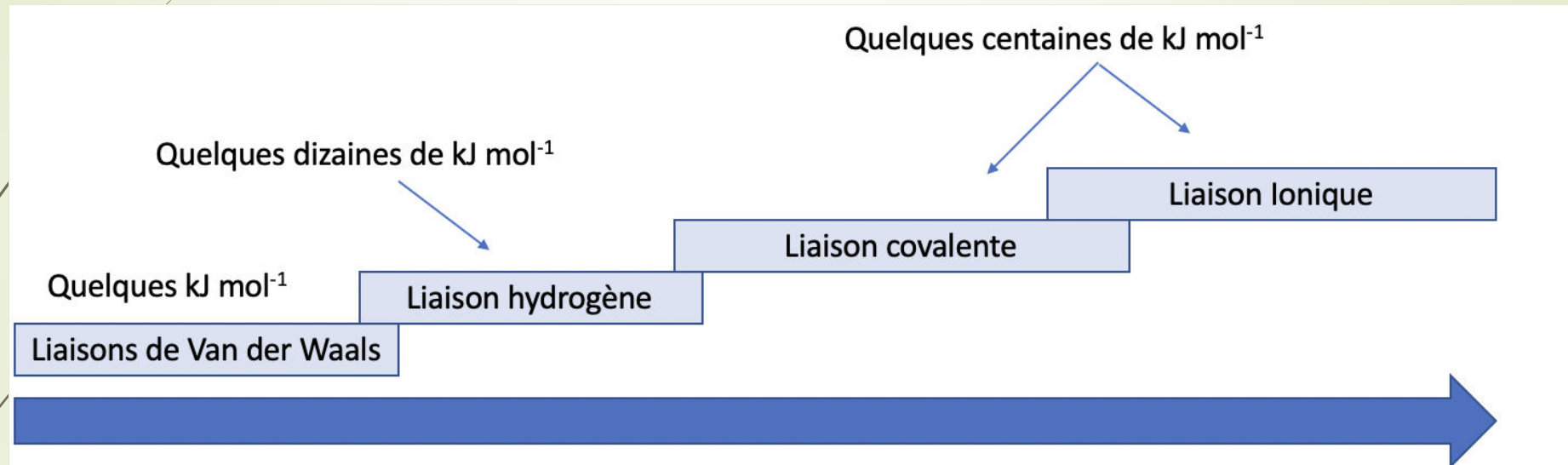
**Validé au cours d'un entretien avec 2 experts
du thème de la liaison chimique**

Vers un modèle unificateur des liaisons chimiques ?

Variation de l'énergie potentielle du système noyaux + électrons en fonction de la distance entre deux noyaux d'atomes d'hydrogène



Vers un modèle unificateur des liaisons chimiques ?



Augmentation de l'intensité de la liaison et donc de l'énergie moyenne de dissociation

Les divers types de liaisons chimiques sont caractérisés par des énergies de dissociation dont les valeurs typiques se recouvrent (Levy Nahum et al., 2010)

Modèle électromagnétique unificateur

D'après Kermen
(2016, 2018)

Registre théorique Théorie quantique
 Théorie électromagnétique

Registre des modèles

Liaison covalente	}	modèle de Lewis modèle des OM
Liaisons de Van der Waals		
Liaison hydrogène	}	Modèles homonymes
Liaison ionique		

Registre empirique

Réalité idéalisée

Réalité perçue
Réalité métaphysique

Langage
symbolique

Modèle
électromagnétique
unificateur



Analyse d'ouvrages : recherche du modèle électromagnétique unificateur

Catégories	Indicateurs permettant de repérer les catégories	Commentaire
Force	force, interaction, loi de Coulomb	Les mots force et interaction sont regroupés car aucun ouvrage n'explicite que l'interaction est interprétée par une force. Certains ouvrages signalent que la loi de Coulomb modélise l'interaction entre charges.
Électromagnétique	électromagnétique, électrostatique	Le terme électrostatique est peut-être utilisé soit de manière impropre soit à l'égal du terme électromagnétique, d'où le regroupement effectué.
Attraction	Attraction	
Répulsion	Répulsion	
Particules	Noyaux, électrons	Nous considérons cette catégorie dès lors que sont mentionnés des interactions entre particules (entre noyaux, entre électrons et/ou entre noyaux et électrons)
Longueur	Longueur moyenne de liaison, distance internucléaire (d'équilibre)	Dès lors que ces indicateurs sont mentionnés même s'il n'est pas précisé qu'il s'agit d'une distance entre noyaux d'atomes d'éléments donnés.
Énergie	Énergie moyenne de dissociation d'une liaison, Force de liaison, énergie potentielle / cinétique	Toute mention du lien entre force et énergie potentielle est prise en compte
Stabilité	Stabilité, plus stable que, minimum d'énergie potentielle	
Courbe	Présence d'un graphique montrant l'évolution de l'énergie potentielle en fonction de la distance internucléaire	Les commentaires qui accompagnent la légende du graphique sont pris en compte pour le repérage des autres catégories
Dynamique	Mouvement (perpétuel, permanent, incessant), énergie cinétique	En l'absence de cette catégorie, la mise en fonctionnement du modèle électromagnétique ne reflète pas un processus.

Analyse d'ouvrages de 1^{er} CU : recherche du modèle électromagnétique unificateur dans le cas de la liaison covalente.

Ouvrage	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7
Force	x	x	x	x	x	x	x
Électromagnétique		x		x	x		
Attraction	x		x		x	x	
Répulsion	x		x			x	
Particules	x		x			x	
Longueur	x	x	x		x	x	x
Énergie	x	x	x		x	x	x
Stabilité	x	x				x	x
Courbe	x		x			x	
Aspect dynamique		x					

Analyse d'ouvrages de 1^{er} CU : recherche du modèle électromagnétique Unificateur (résultats)

Ouvrages : des concepts du modèle électromagnétique repérés malgré une segmentation par type de liaisons chimiques

- Catégorie « **Force** » repérée systématiquement pour tous les types de liaisons chimiques et dans tous les ouvrages
- Catégorie « **Électromagnétique** » repérée dans tous les ouvrages mais pas pour tous les types de liaisons
- Catégories « **Longueur** » et « **énergie** » repérées mais pas toujours simultanément
- La catégorie « **Répulsion** » n'est pas toujours mentionnée lorsque la catégorie « **Attraction** » l'est.

Pas d'unification revendiquée sauf dans un ouvrage

Conclusion

- Mise en avant du **principe physique commun** à toutes les liaisons chimiques → donne un point de vue global aux étudiants.
- Favoriserait les raisonnements basés sur les **énergies de dissociation de liaison** et les **distances internucléaires**.
- **Penser la refonte de l'enseignement de la liaison chimique en introduisant ce modèle unificateur**
- **Cela nécessite de dépasser des habitudes de travail bien ancrées !**

CLUE – Chemistry Life Universe and Everything
Cooper et Klymkowsky (2020)

Merci de votre attention

