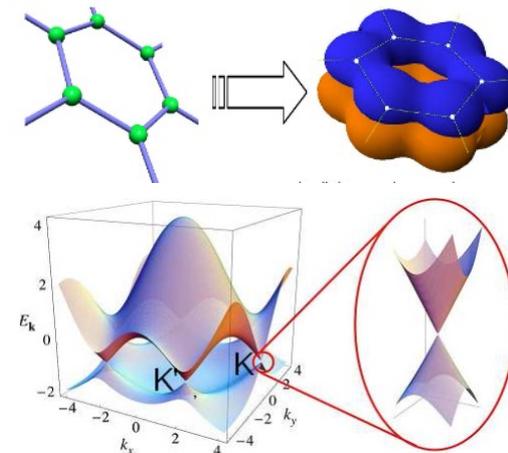


Approche par Problème (APP) pour enseigner la Physique du Solide

Christophe Durand¹, Céline Darie²
Université Grenoble-Alpes, Polytech Grenoble

1. *Laboratoire photonique électronique et ingénierie quantiques (CEA-PHELIQS)*
2. *Institut Néel, Université Grenoble-Alpes*

Filière « Matériaux », 1^{ère} année d'école d'ingénieur (L3, 45 étudiants/an)



L'importance de la Physique du Solide

Modélisation des électrons dans la matière

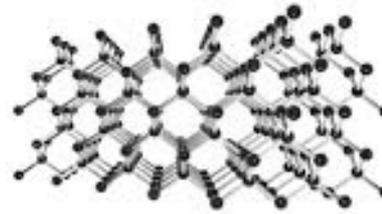
Propriétés thermiques



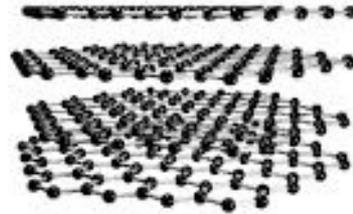
Propriétés électriques



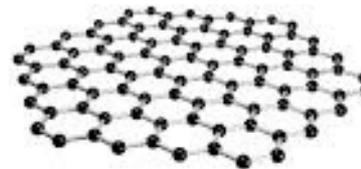
Propriétés optiques



Diamant



Graphite

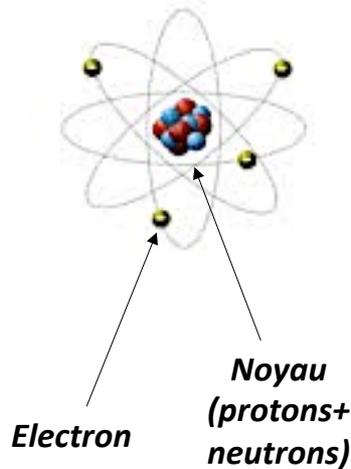


Graphène

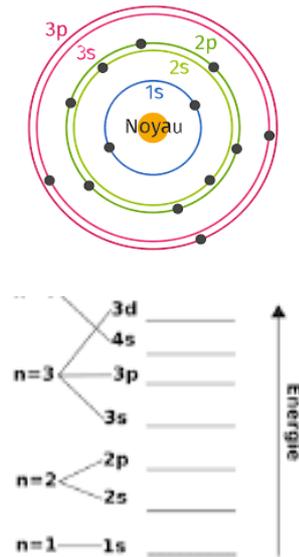
Le point de départ : modèle pour un atome

Les électrons pour un seul atome

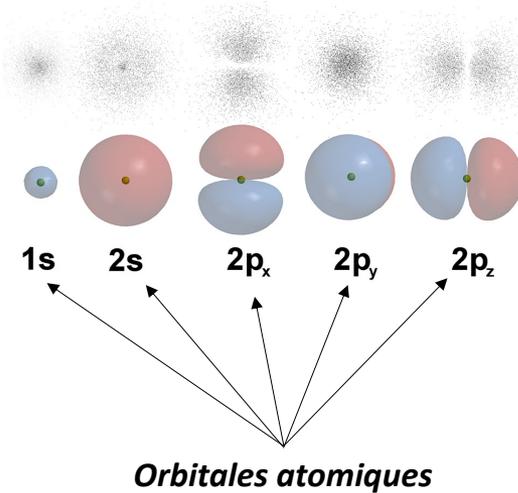
Modèle de Rutherford



Modèle de Bohr



Modèle décrit par la physique quantique



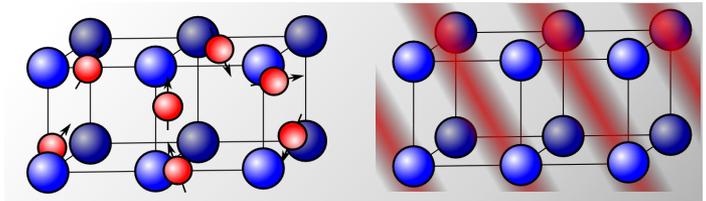
Electrons

Dualité onde - corpuscule

Principe d'incertitude

« Dieu ne joue pas aux dés » (Einstein)

« Cessez de dire à Dieu, ce qu'il doit faire » (Bohr)



$$dP = |\Psi|^2 \cdot d\tau$$

Que devient ce modèle pour N atomes ?

Comment modéliser les électrons des atomes dans la matière ?

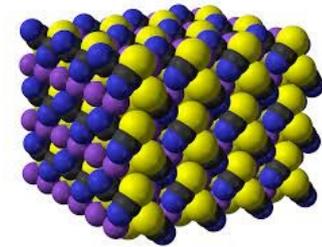
Physique de l'infiniment petit

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(\vec{x}) \right) \Psi(\vec{x}) = E \Psi(\vec{x})$$

$$dP = |\Psi|^2 \cdot d\tau$$

Physique quantique

Physique de l'infiniment grand



© SCHOOLMOUV

Matière = 10^{22} atomes/cm³

UN PROBLEME EXTRAORDINAIREMENT COMPLEXE !

Physique du Solide

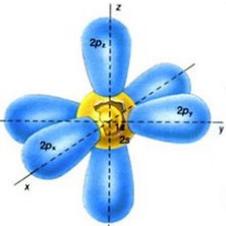
Description des électrons en Physique du Solide

Le connu
Modèle de l'atome isolé



Le nouveau
Modèle de l'atome non-isolé

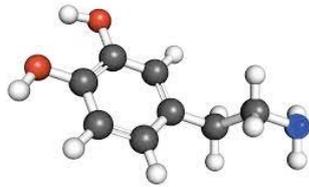
L'atome



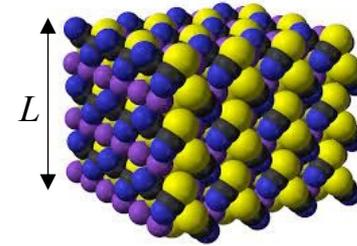
Schrödinger (1926)



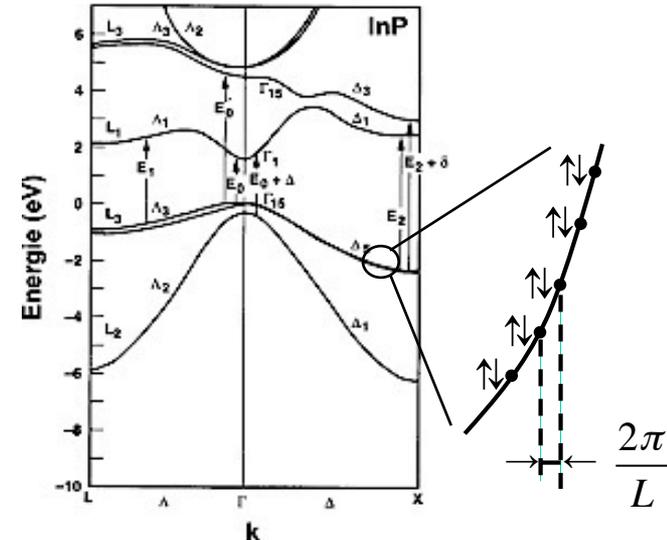
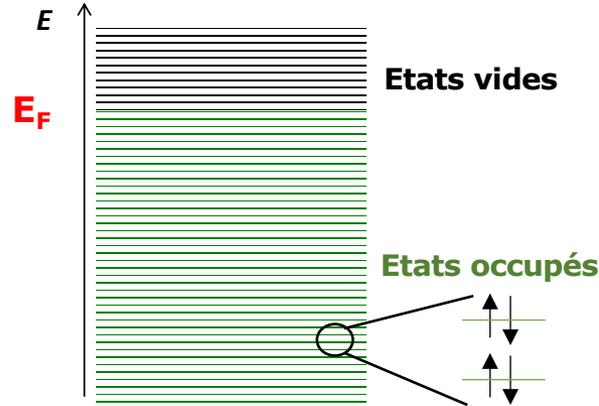
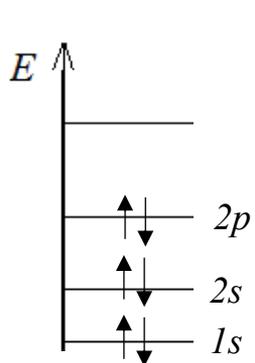
Liaisons Chimiques
La molécule (qq atomes)



Physique du Solide
Le solide (10^{22} atomes/cm³)



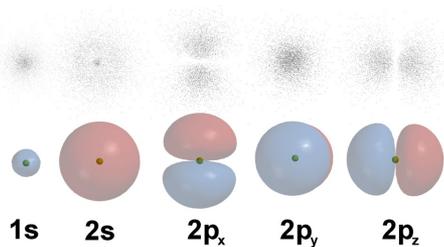
nb d'atomes = nb de niveaux possibles



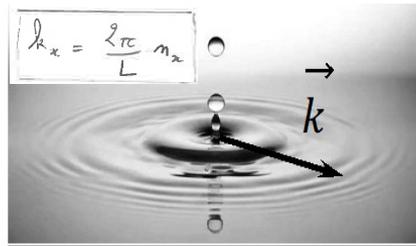
Les difficultés pour enseigner la Physique du Solide

Trois obstacles épistémologiques

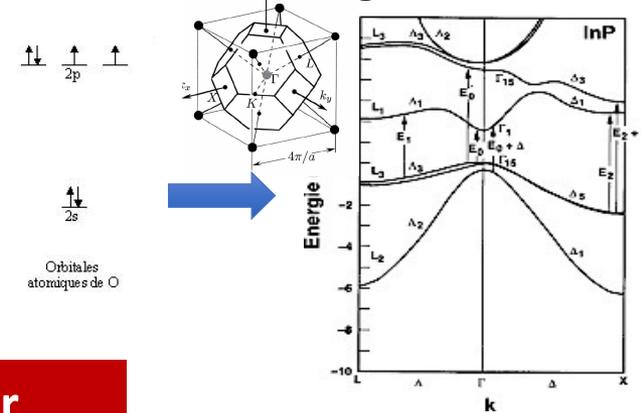
Modèle de l'atome isolé
profondément ancré



Le vecteur d'onde k



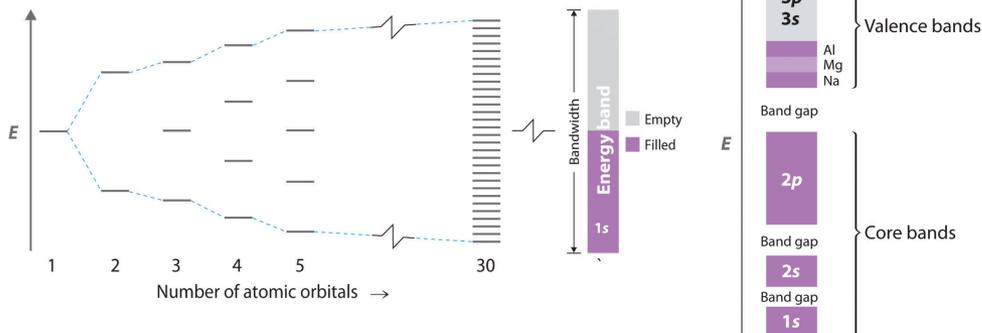
Remplissage des
niveaux d'énergie en 3D



Deux manières d'enseigner

Approche du Chimiste

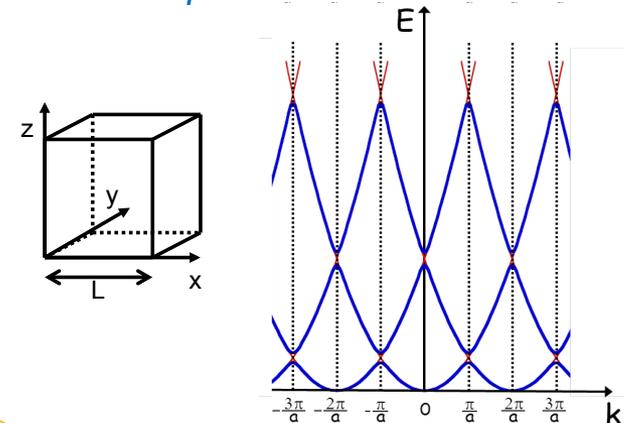
Combinaison linéaire des orbitales atomiques
(Liaisons fortes)



😊 Lien entre Bandes d'énergie/Orbitales Atomiques

Approche du Physicien

Electrons quasi-libres dans une boîte



😊 Lien entre le vecteur k et le réseau cristallin

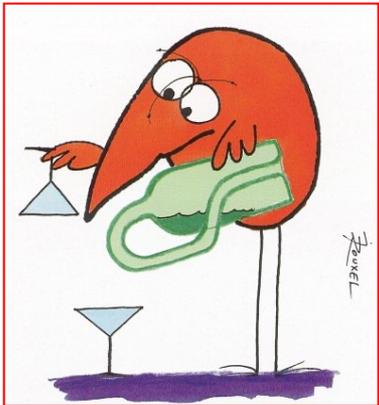
Plan de l'exposé

- 1. Qu'est-ce que l'Approche Par Problème (APP) ?**
- 2. Comment mettre en œuvre un APP pour la Physique du Solide ?**
- 3. Analyse avant/après : Quel bilan sur les étudiants ?**

Apprentissage par problèmes (APP)

Approche socio-constructiviste

Le problème



Le groupe

Problem Based Learning (PBL): Méthode pédagogique initiée dans les années 70 pour les formations médicales.

Développement de l'APP dans les formations d'ingénieurs à partir des années 2000 (Ecole Polytechnique de Louvain)

Une organisation APP typique

Travail Personnel TRAP
(50-70 % du temps total de travail)

Enseignant → Tuteur

Séance « Aller »

- Comprendre la tâche (clarifier, reformuler)
- Faire le point sur ce que l'on sait
- Formuler des pistes



- Réaliser le plan d'action (travail individuel)



Séance « Retour »

- Mettre en commun (comparer et évaluer)
- Construire une solution
- Faire le bilan



- Favoriser l'expression de chacun



- Déterminer les responsabilités



- Organiser le groupe



Séance de Clôture

- Cours de synthèse/reconstruction
- Evaluation **INDIVIDUELLE** (Quick-test)



+ séances « mini-cours ou/et de questions/réponses »

source: FA2L
(UCLouvain)

Séquençage coordonné des APP

Année universitaire 2013/14

UE PHY124 – Optique Géométrique

Apprentissage par problèmes – APP1

Les lunettes d'assurance



Apprentissages visés

Indice optique et applications des lois de Snell-Descartes

**Indice optique
Loi de Snell-Descartes**

Exemple d'un APP en L1 d'optique géométrique Département de Licence (UGA)

Année universitaire 2013/14

UE PHY124 – Optique Géométrique

Apprentissage par problèmes – APP2

Réalisation et observation d'images tridimensionnelles (home – made cinéma 3D)



Apprentissages visés

Lentilles convergente et divergente, relation de conjugaison, distances focale image et objet, conception d'un système optique à une lentille

**Système optique à une
lentille**

Grand, N. Meunier, E. Moraux

Conception : O. Jacquin et P. Delorme

Année universitaire 2013/14

UE PHY124 – Optique Géométrique

Apprentissage par problèmes – APP3

Authenticité des billets de 5 euros



Apprentissages visés

Fonctionnement d'un système optique à plusieurs lentilles

**Système optique
complexe à plusieurs
lentilles**

Grand, N. Meunier, E. Moraux

Choix ciblé de la situation-problème

Exemple d'un APP en L1 d'optique géométrique Département de License (UGA)

Année universitaire 2013/14

UE PHY124 – Optique Géométrique

Apprentissage

Les lun



App
Indice optique et appli

Indic
Loi de S

Passionné d'escalade, un ami expérimenté vous parle d'une des dernières nouveautés « *super pratique* », il s'agit les lunettes d'assurance pour ne plus avoir mal au cou ! En effet, ces lunettes à prismes permettent d'assurer en toute sécurité votre partenaire sans lever la tête.



97,50 €

Mais devant le prix de ces lunettes (environ 100 €), vous décidez de réaliser un prototype « fait-maison » avec des collègues étudiants de votre filière. Les armoires de l'université regorgent de trésors aussi variés qu'inattendus et vos enseignants ont réussi à y dénicher une vieille boîte remplie de prismes divers. Allez-vous pouvoir fabriquer vos lunettes ? A vous de jouer.

Intrigués par ces fameuses lunettes, vos enseignants vous questionnent sur leur fonctionnement. En particulier, ils vous demandent :

- Question n°1 :** d'identifier les différents phénomènes optiques mis en jeu, et d'en rendre compte sous la forme d'un tracé de rayon précis ;
- Question n°2 :** de justifier le choix d'un matériau et d'une géométrie pour le prisme, en vous appuyant sur les calculs appropriés ;
- Question n°3 :** d'expliquer en quoi l'orientation de l'image est préservée (par rapport à un assurance sans lunettes).

Apprentissage par problèmes/Apprentissage par projets

	Approche par Problèmes	Approche par Projets
Durée	1h 1 j 1 sem. 2 sem. 1 mois 2 mois 6 mois 1 an	1h 1 j 1 sem. 2 sem. 1 mois 2 mois 6 mois 1 an
Tuteur	Expert	Méthodologique
Acquisition	Connaissances	Compétences
Tâches à réaliser	Identiques	Différentes
Discipline	Multi-disciplinaire	Tâches complexes
Tâches réalisées	Mono-disciplinaire Trans-disciplinaire	Tâches simples (type exercices) Tâches Authentiques
Evaluation	Individuelle	Collective

Plan de l'exposé

1. **Qu'est-ce que l'Approche Par Problème (APP) ?**
2. **Comment mettre en œuvre un APP pour la Physique du Solide ?**
3. **Analyse avant/après : Quel bilan sur les étudiants ?**

Fusion de 2 cours

Avant 2015

2 cours (CM/TD)
2 enseignants

Liaisons Chimiques

Céline Darie
« Chimiste »
8 CM + 5 TD = 44h

Physique du Solide

Christophe Durand
« Physicien »
5 CM + 3 TD = 27h

Après 2016

Approche graduelle

Fusion des 2 cours en 4 séquences-problèmes / 2 enseignants ensemble

Liaisons chimiques

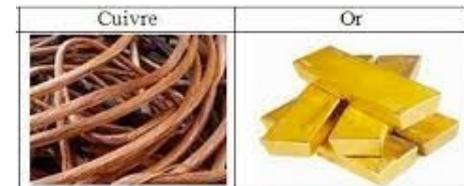
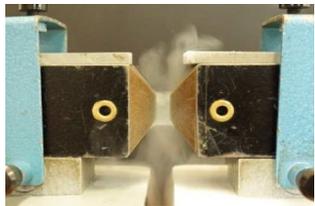
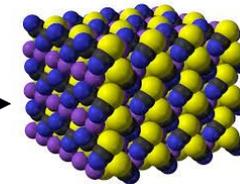
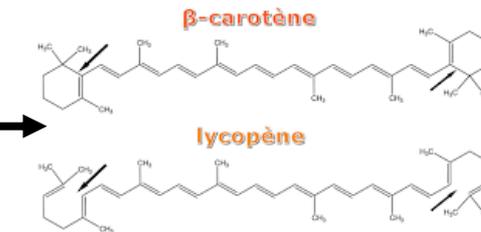
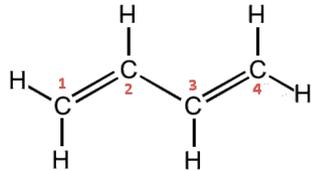
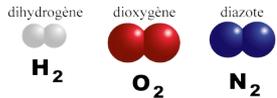
Physique des Solides

Problème n°1: 2 atomes

Problème n°2: 4 atomes

Problème n°3: 22 atomes

Problème n°4: 10²² atomes

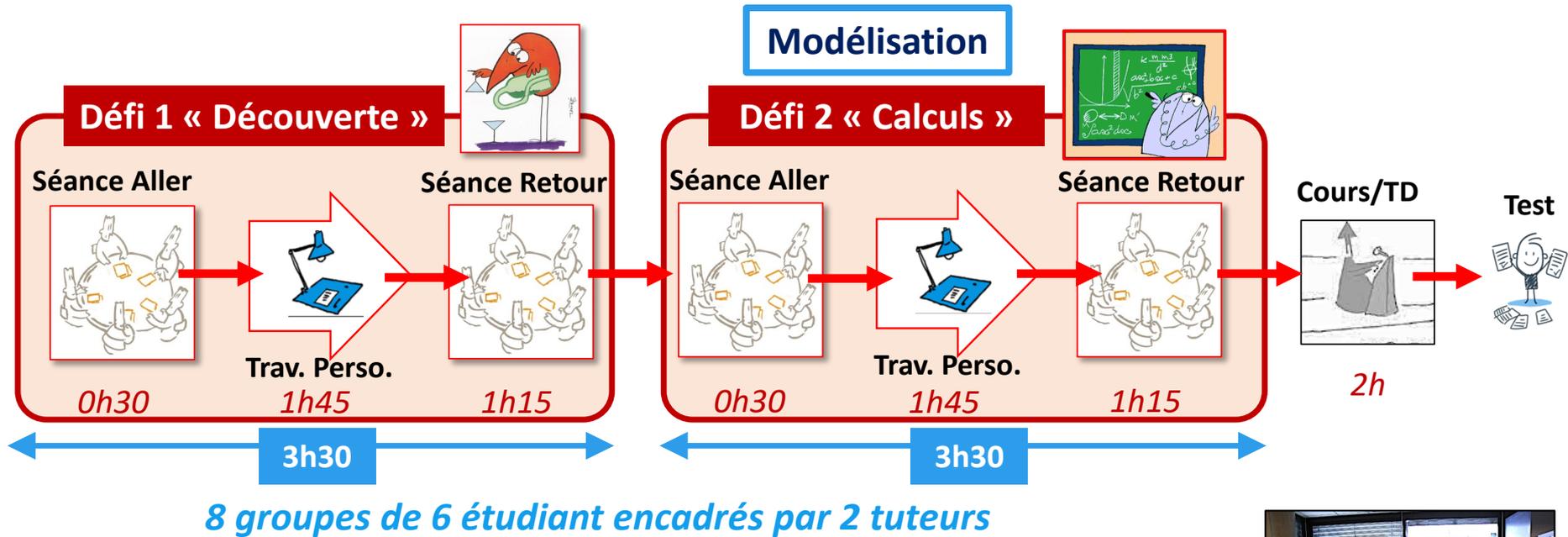


Janvier

Février

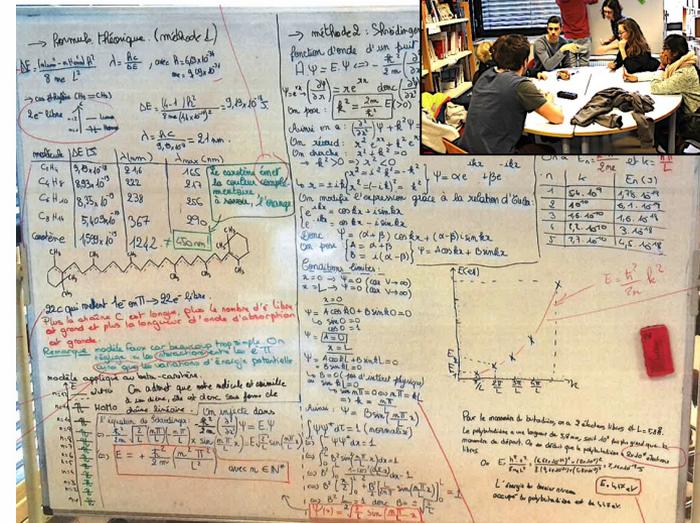
Mars

Organisation d'une séquence APP



Choix importants :

- Inclure le **travail personnel en séance** avec présence des enseignants
- **Compte-rendu sur tableau** construit collectivement
- **Cours de clôture** avec synthèse du cours et excercisation



séquençage complet

Liaisons chimiques

Physique du Solide

Physique des semiconducteurs

Janvier

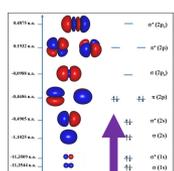
Février

Mars

Fin Mars

POLYTECH GRENOBLE
Année universitaire 2017/18
Département « Matériaux » – Année 3
Apprentissage Par Problèmes (APP):
« De la molécule aux matériaux solides »
S6 – UE3 : Liaisons chimiques
APP 1 : « Les deux font la paire »

OA vers OM :
Orbitales Atomiques vers Orbitales Moléculaires

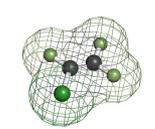


Apprentissages visés
Diagramme des niveaux d'énergie pour une molécule diatomique.
Utilisation de la méthode de Combinaison Linéaire d'Orbitales Atomiques (CLOA)

APP1

Ce livret appartient à : _____

POLYTECH GRENOBLE
Année universitaire 2017/18
Département « Matériaux » – Année 3
Apprentissage Par Problèmes (APP):
« De la molécule aux matériaux solides »
S6 – UE3 : Liaisons chimiques
APP 2 : « Le carbone dans tous ses états »

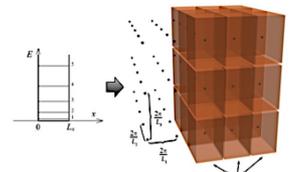


Apprentissages visés
Diagramme des niveaux d'énergie pour une molécule polyatomique.
Méthodes d'hybridation
Traitement de la liaison par la méthode CLAO
Méthodes de Hückel.

APP2

Ce livret appartient à : _____

POLYTECH GRENOBLE
Année universitaire 2017/18
Département « Matériaux » – Année 3
Apprentissage Par Problèmes (APP):
« De la molécule aux matériaux solides »
S6 – UE 4 Physique et Matériaux
Physique et semiconducteurs - Partie I : Physique du Solide
APP 3 : « A plusieurs, on est plus fort »



Apprentissages visés
Modèle de Sommerfeld
Niveau/surface de Fermi
Densité des états électroniques - Statistique de Fermi-Dirac

APP3

Ce livret appartient à : _____

POLYTECH GRENOBLE
Année universitaire 2017/18
Département « Matériaux » – Année 3
Apprentissage Par Problèmes (APP):
« De la molécule aux matériaux solides »
S6 – UE 4 Physique et Matériaux
Physique et semiconducteurs - Partie I : Physique du Solide
APP 4 : « Mind the gap ! »



Apprentissages visés
Potentiel périodique d'un cristal et Théorème de Bloch – Zone de Brillouin
Modèle des électrons quasi-libres – Modèle des liaisons fortes
Construction d'un diagramme de bande

APP4

Ce livret appartient à : _____

APP0

Calcul exact
avec H_2^+

Combinaison linéaire
des orbitales
atomiques

Electrons libres
dans une boîte

Electrons
quasi-libres

Liaisons
fortes

D'un modèle à l'autre

Découverte du travail en APP

APP0 : « Apporte ton grain de sable »

Objectifs :

- Comprendre le travail en groupe et la méthode APP
- Invitation à la modélisation
- Travail sur les grands nombres

DEFI n° 1 : « le laisser-faire »

VOTRE MISSION



Répondre à la question suivante :
Combien y-a-t-il de grains de sable sur la Terre ?

$N_{\text{grain de sable}} = \text{env. } 10^{24} \text{ (Terre)}$

DEFI n° 2 : « une organisation précise »

VOTRE MISSION



Répondre à la question suivante :
Combien y-a-t-il de grains de sable utilisés par l'humanité?



Le travail se déroulera en 2 temps :

1^{er} temps - TRAVAIL PERSONNEL - TRAP (10 min) :

ATTENTION : Travail strictement individuel. Interdiction de discuter avec ses voisins !!!!!!!

Essayer de résoudre par vous-même le défi n°2.

2^e temps - Travail en équipe (20 min)

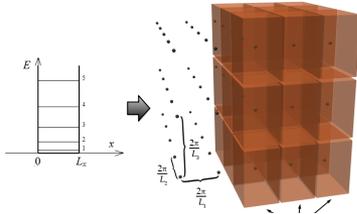
ATTENTION : Travail strictement collectif. Obligation de discuter avec son groupe !!!!!!!

Avant de commencer, attribuer les rôles suivants :

Animateur : s'assure que le groupe suit les étapes prévues et anime la discussion (distribue la parole, suscite /solicite la participation ou modère les interventions)

Exemple de contenu d'un APP

APP3 : « A plusieurs, on est plus fort »



Objectifs :

- **Modèle des électrons libres (Modèle de Sommerfeld)**
- **Quantification du vecteur d'onde k de la fonction d'onde**
- **Modèle appliqué à un système 1D, 2D et 3D**

Défi n°1

Pourquoi les tomates sont rouges ?

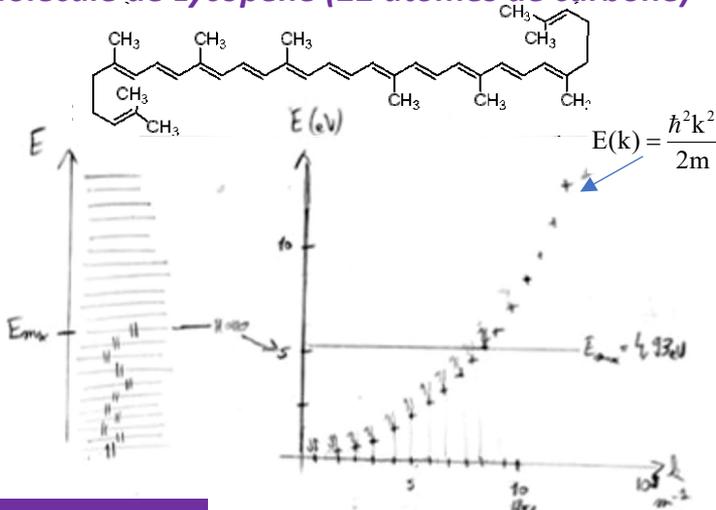


Modèle d'un électron dans un puit quantique

Application d'un modèle connu

Modèle des électrons libres à 1D

Molécule de Lycopène (22 atomes de carbone)

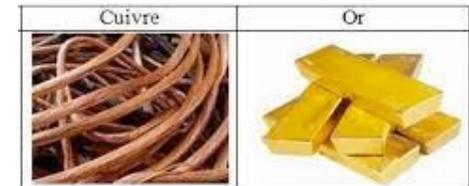


Limite du modèle

← Polymère (10⁶ atomes de carbone)

Défi n°2

Quel est le meilleur conducteur entre le cuivre et l'or ?

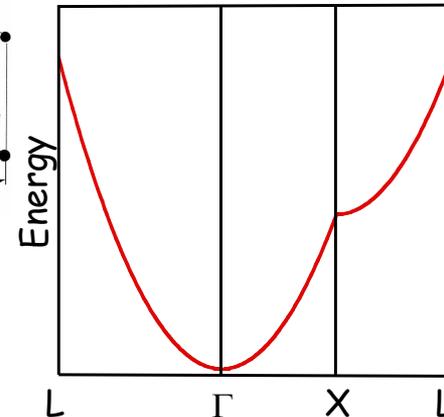
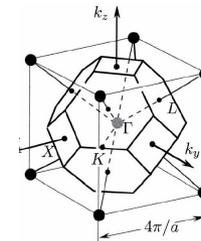
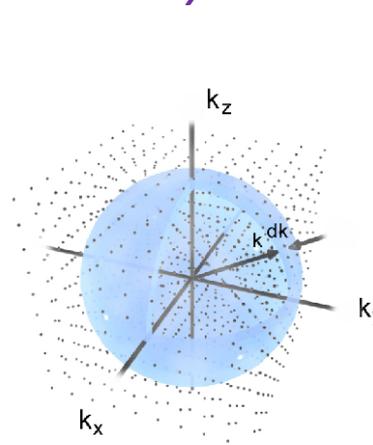


Modèle des électrons libres à 3D

Modèle des électrons libres à un système 2D

Transposer

Modèle des électrons libres à un cristal (3D)
10²² atomes/cm³

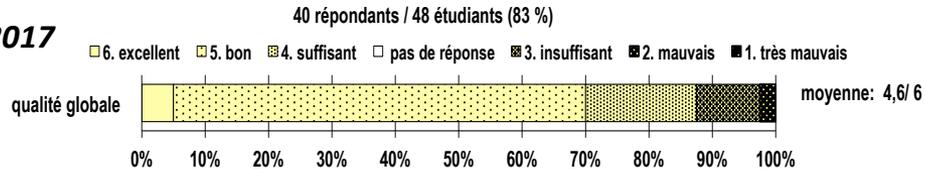


Plan de l'exposé

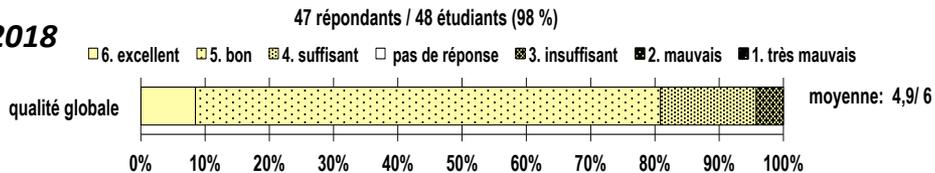
- 1. Qu'est-ce que l'Approche Par Problème (APP) ?**
- 2. Comment mettre en œuvre un APP pour la Physique du Solide ?**
- 3. Analyse avant/après : Quel bilan sur les étudiants ?**

Satisfaction des étudiants

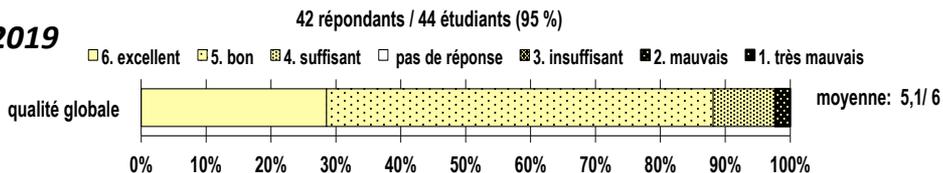
2016-2017



2017-2018



2018-2019



Après 3 ans:

- **95% des étudiants adhèrent à l'APP**
- **30% des étudiants trouvent l'APP « Excellent »**

Point de vigilance des APP: 10-15% de groupes dysfonctionnent

Ce que j'ai aimé :

- *Travail en groupe (95% satisfait)*
- *Dispositif/organisation des APP*
- *Engagement/disponibilité des enseignants*
- *Entraide/Bonne ambiance*

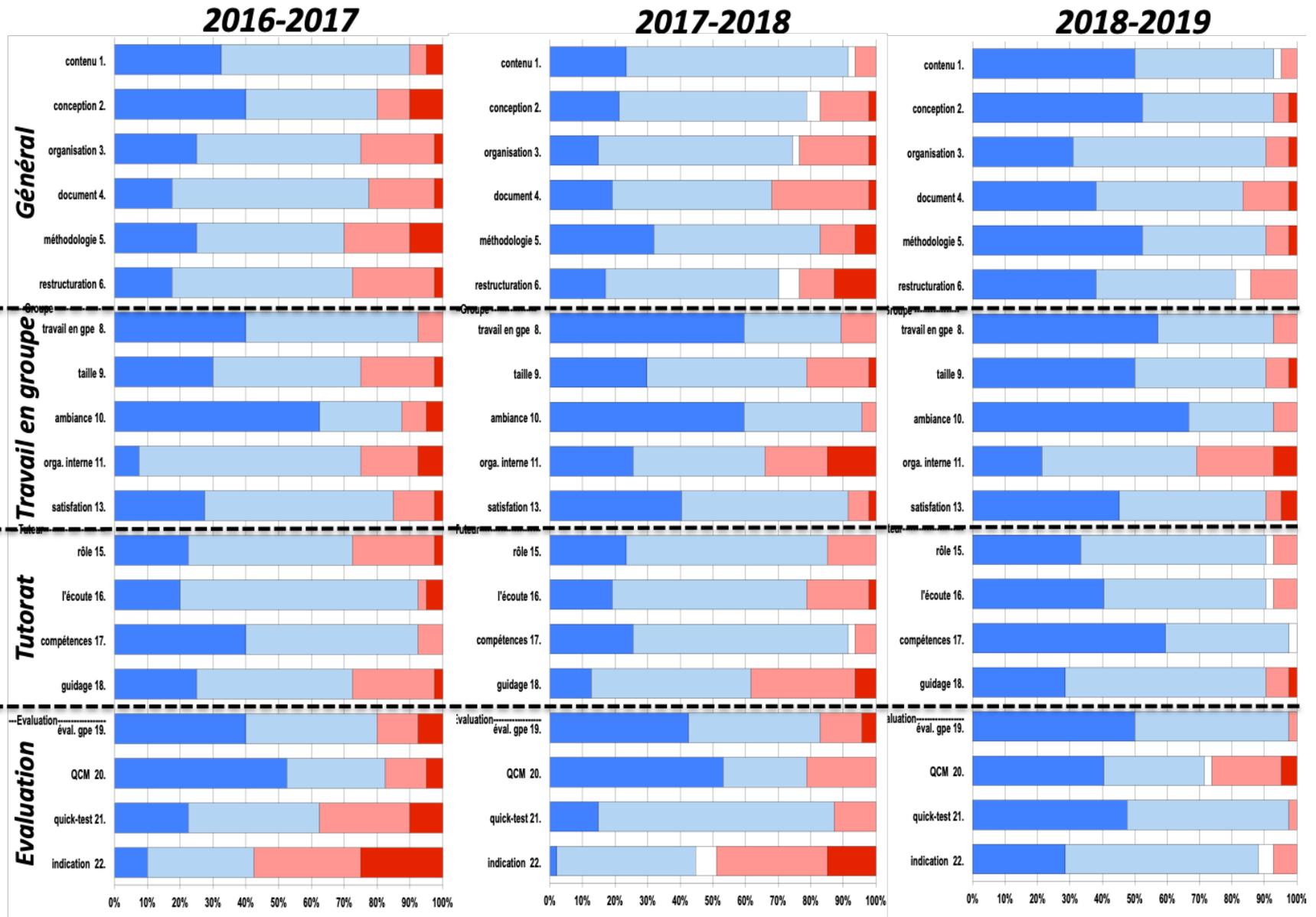
Ce que je n'ai pas aimé :

- *Manque d'exercice, préparation à l'examen*
- *Certains étudiants peu investis*
- *Pas assez de réponses de la part des enseignants*

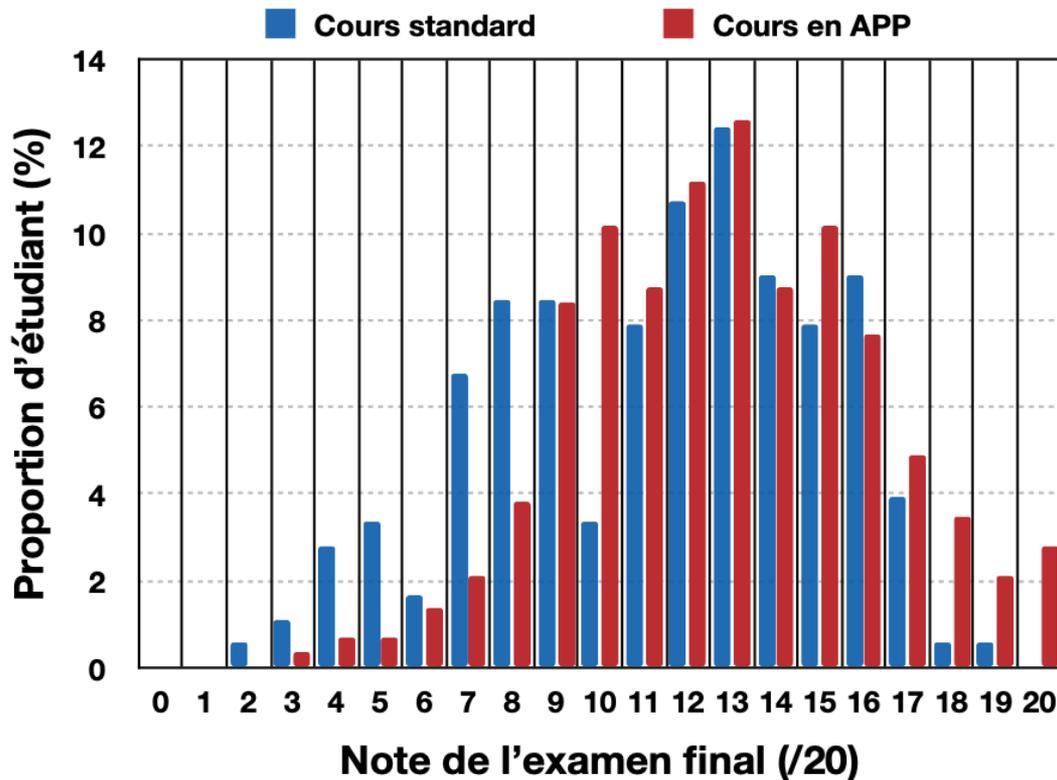
Actions réalisées :

- **Séance de clôture avec exercices d'examen**
- **Enseignants disponibles pendant le travail personnel**
- **Sujets qui ciblent mieux les apprentissages**

Analyse du dispositif APP par les étudiants



Résultats à l'examen terminal avant/après



Avec les APP:

- Notes <7 : 15% → 5%
- Notes <10 : 34% → 17%
- Notes >18 : 0% → 8%

Moyenne: +0,93 /20

A retenir :

- 1/6 des étudiants en-dessous de la moyenne (au lieu de 1/3)
- Forte éduction des d'étudiants en grande difficulté (<7/20)
- D'excellentes notes (> 18/20) possibles (5-10%)

Statistiques faites :

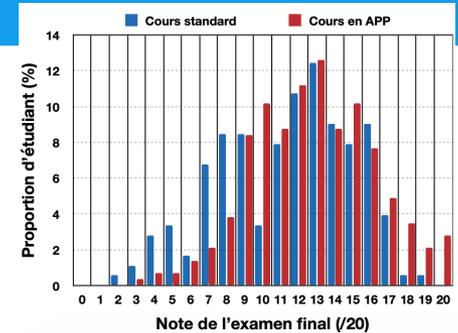
- sur 2 ans pour le cours standard
- sur 3 ans pour le cours en APP

Conclusion

- **Forte adhésion des étudiants** au dispositif pédagogique malgré un cours théorique difficile
- **Amélioration des résultats** de l'examen terminal
- **Plaisir d'enseigner** et de collaborer entre 2 enseignants de disciplines différentes



Darie, C.; Durand, C.. Les Ann. QPES 2021, 1 (3).



Depuis 2021, extension des APP à la « Physique des Semiconducteurs »
½ journée d'APP/semaine sur l'ensemble d'un semestre

