

*UE1 : Chimie – Chimie physique*

---

Chapitre 2 :  
**Atomes polyélectroniques**

Pierre-Alexis GAUCHARD

Agrégé de chimie, Docteur ès sciences

---

Année universitaire 2011/2012

Université Joseph Fourier de Grenoble - Tous droits réservés.

# Chapitre 2.

## Atomes polyélectroniques

**I. Résolution de l'équation de Schrödinger**

**II. Configuration électronique**

# I. Résolution de l'équation de Schrödinger

Résolution impossible sans approximation du fait des répulsions entre électrons.

**I.1) approximation orbitalaire ou monoélectronique**

**I.2) notion d'effet d'écran**

**I.3) fonctions propres monoélectroniques**

**I.4) diagramme énergétique**

# I.1) Approximation orbitalaire ou monoélectronique

**L' approximation orbitalaire** : Pour un atome comportant  $i$  électrons, la fonction propre polyélectroniques est égale au produit de  $i$  fonctions propres monoélectroniques indépendantes

(les électrons sont considérés comme indépendants des uns des autres).

Négliger totalement la répulsion entre électrons est une approximation trop grossière

On va moyenner les interactions électrostatiques à travers la notion d'effet d'écran

## I.2) Notion d'effet d'écran

Atome polyélectronique de numéro atomique  $Z$  :

➤ charge du noyau =  $Z.e$

avec  $e$ : charge élémentaire =  $1,6.10^{-19}$  C

➤  $Z$  également appelé nombre de charge

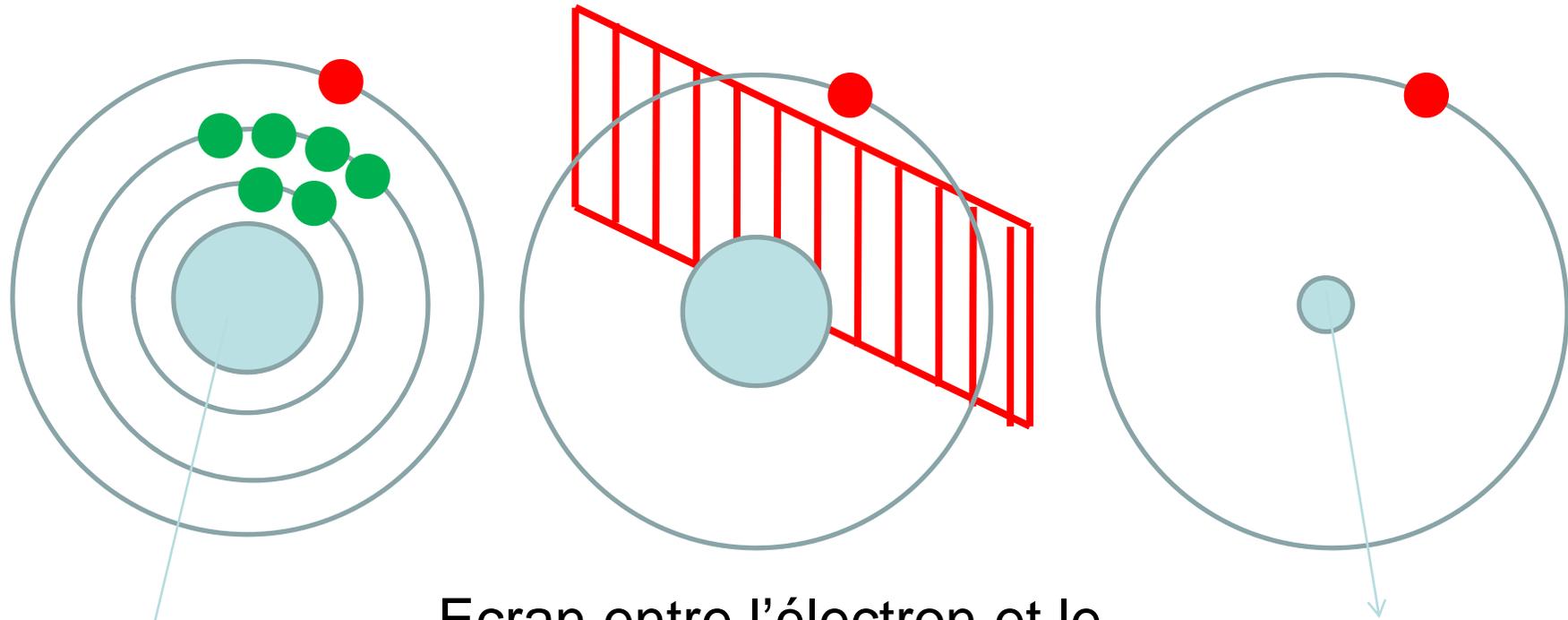
On considère qu'un électron donné est soumis à l'action d'un noyau ayant un nombre de charge dit *nombre de charge effectif*  $Z^*$  inférieur au nombre de charge  $Z$  du noyau de l'atome.

$$Z^* = Z - \sigma$$

où  $\sigma$ , appelée constante d'écran, représente l'effet moyen exercé par les autres électrons sur l'électron donné.

Par abus de langage,  $Z^*$  est également appelée charge effective (en réalité la charge effective est  $Z^*.e$ )

## I.2) Notion d'effet d'écran



Noyau de  
numéro  
atomique  $Z$

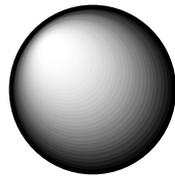
Ecran entre l'électron et le  
noyau  
→ Constante d'écran  $\sigma$

Noyau fictif  
de numéro  
atomique  
 $Z^* = Z - \sigma$

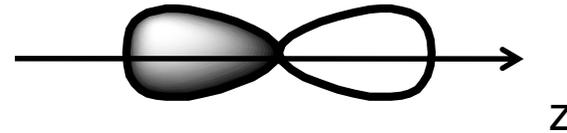
## I.3) Fonctions propres monoélectroniques

Chaque électron va pouvoir être décrit dans l'approximation orbitale par une des fonctions propres solutions du cas simple de l'atome d'hydrogène (1s, 2s, 2p, etc).

La représentation des orbitales atomiques est la même que dans le cas de l'atome d'hydrogène.



OA ns



OA np<sub>z</sub>

Pour les fonctions propres l'influence de l'écran des autres électrons n'intervient pas → ce sont les énergies qui vont être modifiées par rapport au cas de l'atome d'hydrogène par l'effet d'écran des autres électrons.

# I.4) Diagramme énergétique

systemes polyélectroniques :  
introduction de l'effet d'écran

→ énergies dépendent de  $n$  et de  $l$  :  $E(n,l)$

Systeme à 1 électron :  $E(n)$   
 $n$  définit une couche (couches K, L, M, N, ...)

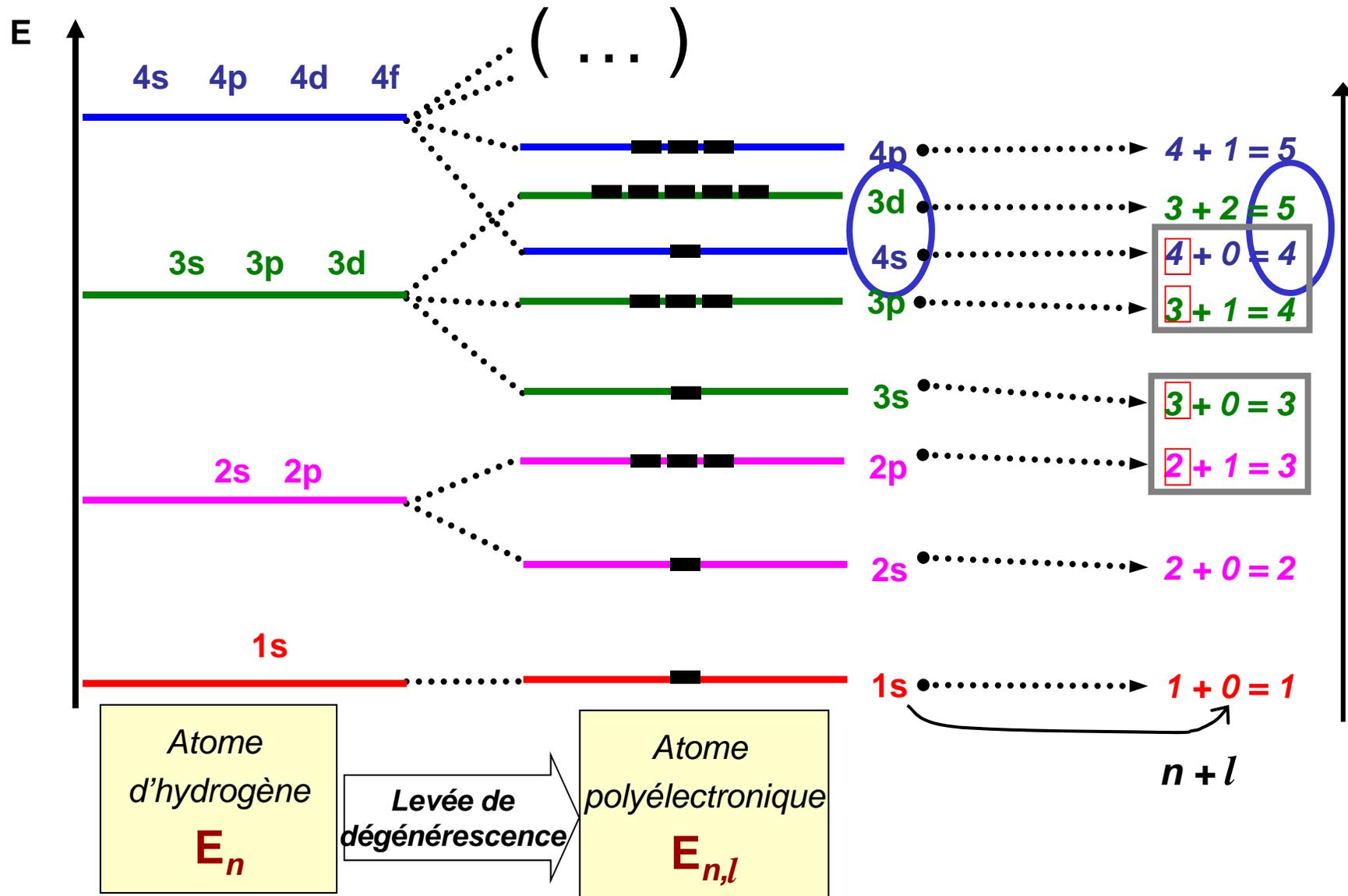
Systeme polyélectroniques:  $E(n,l)$   
Le couple  $(n, l)$  définit une sous-couche

## Règle de Klechkovski

**L'énergie des sous-couche augmente quand la somme  $(n + l)$  augmente.**

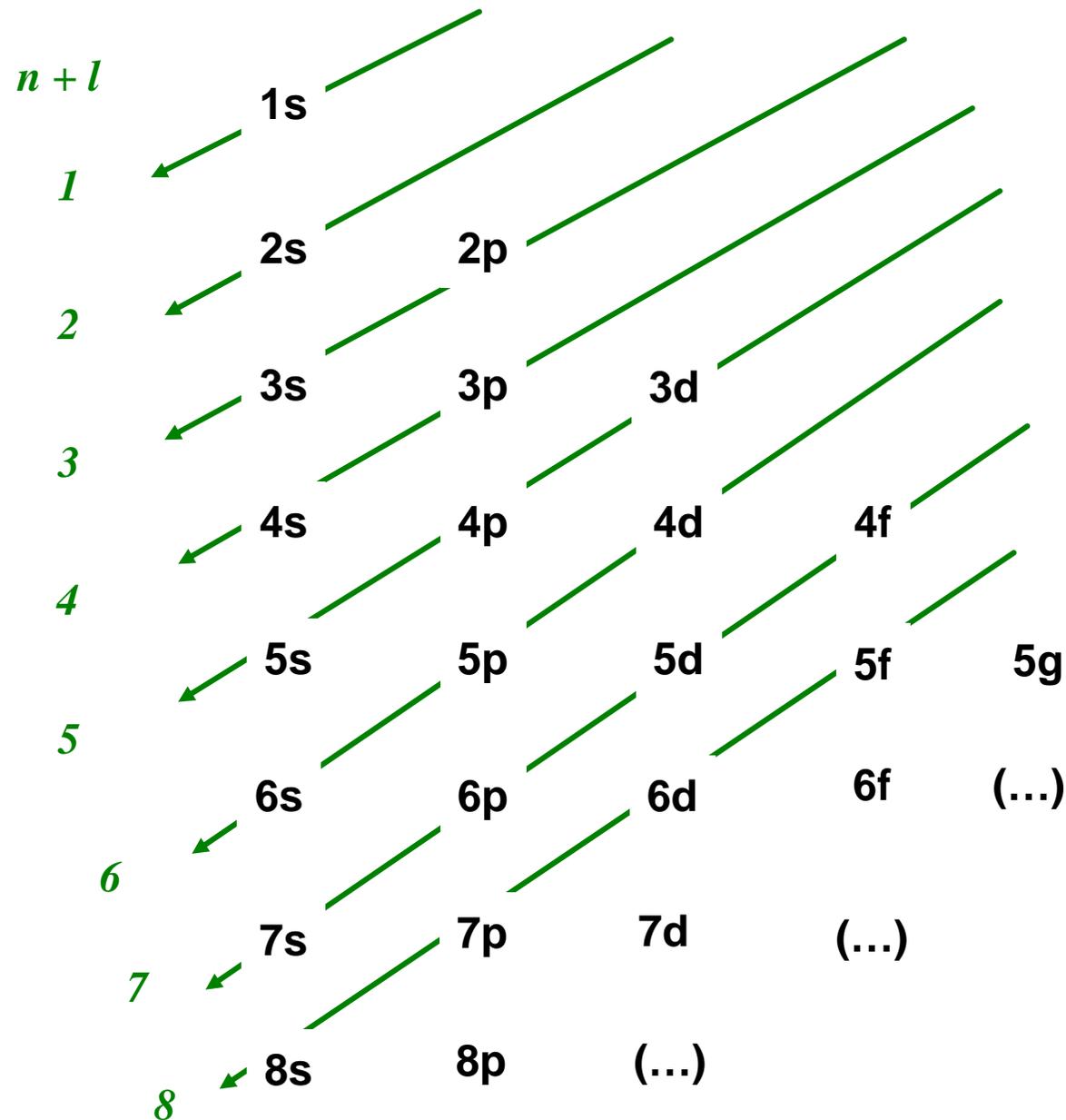
**Lorsque la somme  $(n + l)$  est identique pour 2 sous-couches,  
la sous-couche de plus basse énergie est celle pour laquelle  $n$  est le plus petit.**

# I.4) Diagramme énergétique



## I.4) Diagramme énergétique

Moyen mnémotechnique pour la  
règle de Klechkovski



D'où l'ordre:

1s  
2s  
2p  
3s  
3p  
4s  
3d  
4p  
5s  
4d  
5p  
6s  
etc.

↓ Energie

# II. Configuration électronique

**II.1) position du problème**

**II.2) règles de “remplissage”**

**II.3) Electrons de coeur / de valence;  
représentation de Lewis d'un atome**

**II.4) exceptions aux règles de remplissage**

**II.5) configuration électronique des ions à l'état  
fondamental**

## II.1) Position du problème

Écrire une configuration électronique d'un atome  
=  
Répartir les électrons de l' atome sur les différents niveaux énergétiques  
=  
« Remplir » les électrons dans les différentes orbitales atomiques

Rappel → une OA est décrite par 3 nombres quantiques:  $n$ ,  $\ell$  et  $m$ .

Mais lorsqu'on s'intéresse au remplissage des OA par des électrons, on prend en compte un 4<sup>ème</sup> nombre quantique qui rend compte des propriétés magnétiques de l'électron.

4<sup>ème</sup> nombre quantique : nombre quantique de spin

L'électron possède un mouvement de révolution sur lui-même appelé « spin »

$$S = 1/2$$

Le sens de rotation est caractérisé par le « moment magnétique de spin »

$$m_s = + 1/2 \text{ ou } - 1/2$$



## II.2) Règles de “remplissage”

### ii) Règle de stabilité

**On « remplit » les OA par ordre croissant d'énergie en commençant par l'OA de plus basse énergie (OA 1s)**

- de manière à obtenir la configuration de minimum d'énergie
- valable pour la configuration électronique dans l'état fondamental !
  
- ordre croissant d'énergie des OA est donné par la règle de Klechkovski

## II.2) Règles de “remplissage”

### iii) Les 3 types de représentation de la configuration électronique

#### Illustration des 3 types de représentation sur l'exemple de l'atome de Bore ( ${}_5\text{B}$ ) dans son état fondamental:

##### Représentation dans le diagramme énergétique

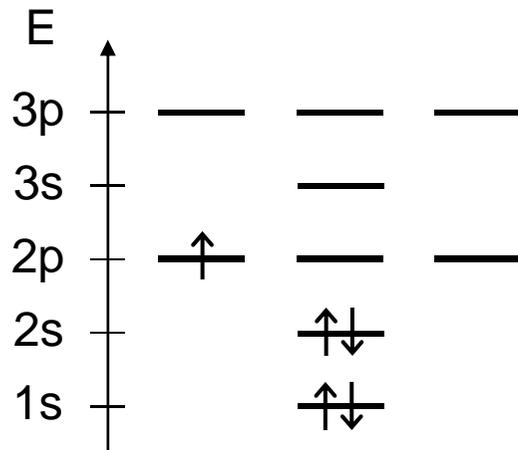
les électrons sont représentés par des flèches verticales.

↑ : électron de  $m_s = +1/2$

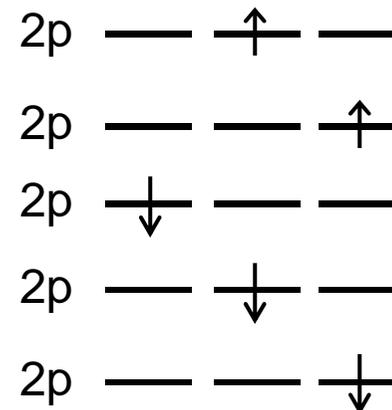
↓ : électron de  $m_s = -1/2$

↑↓ : deux électrons décrits par la même OA. Ces électrons sont anti-parallèles ( $m_s$  différents) pour respecter le principe d'exclusion de Pauli

##### Une représentation possible



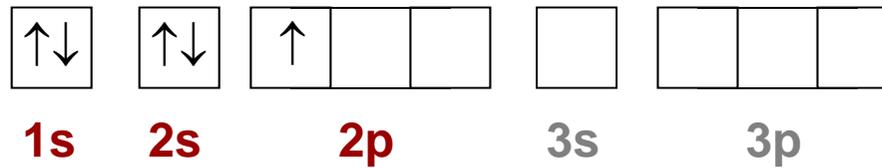
##### Les 5 autres représentations équivalentes (les niveaux 1s et 2s étant les mêmes)



## II.2) Règles de “remplissage”

Représentation en cases quantiques :

les OA sont représentées par des cases appelées « *cases quantiques* ».  
Les cases accolées représentent des OA dégénérées.



Idem : 5 autres représentations équivalentes

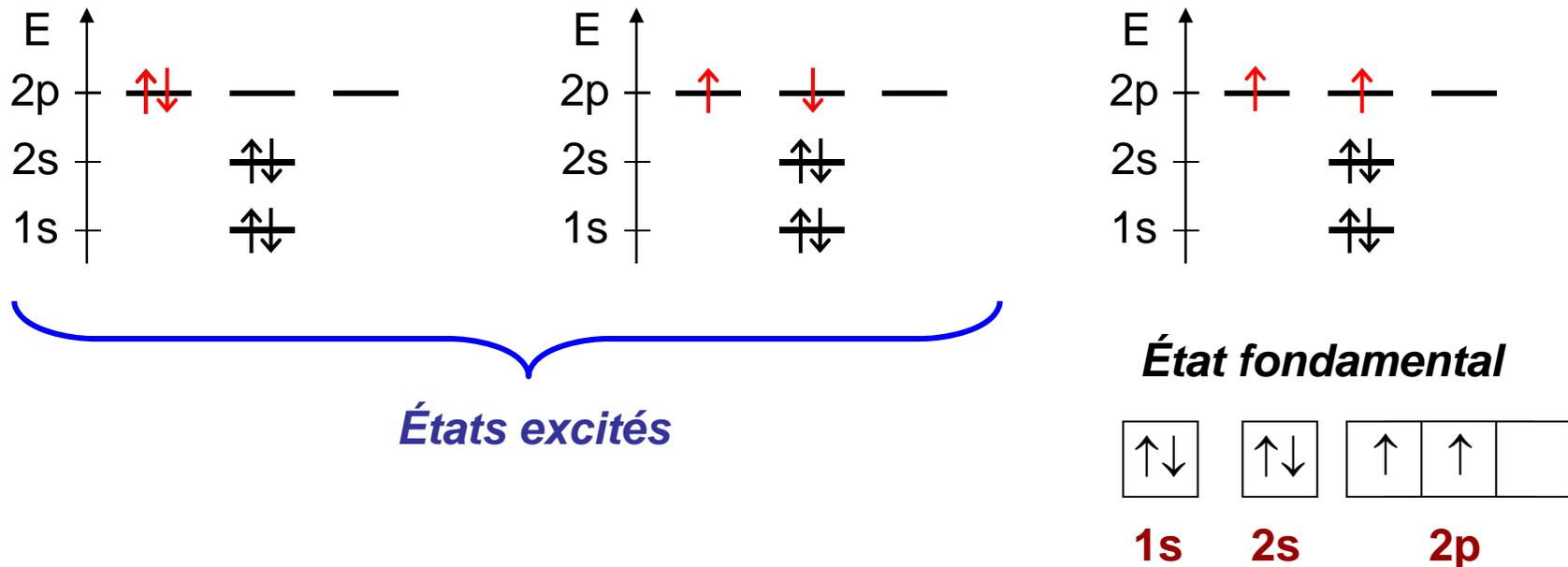
Écriture simplifiée de la configuration électronique:



## II.2) Règles de “remplissage”

### iv) La règle de Hund

Exercice : configuration électronique du carbone ( ${}_6\text{C}$ ) dans son état fondamental ?

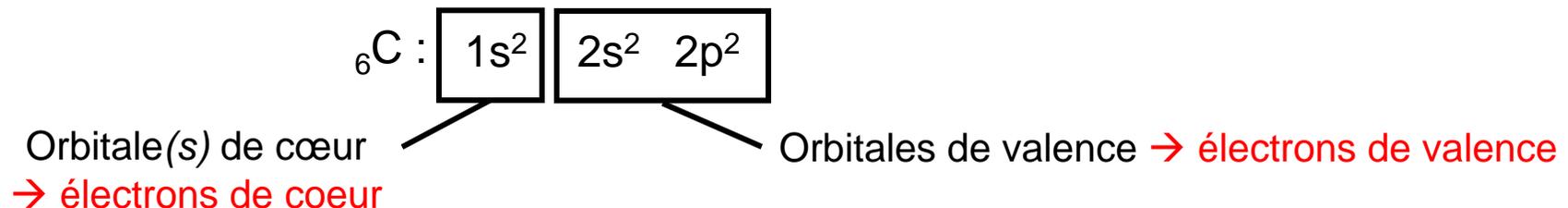


**Règle de Hund : Pour des orbitales dégénérées, l'état de stabilité maximum est obtenu lorsque les électrons occupent le nombre max de ces OA dégénérées, leur spin étant parallèles.**

**Attention : l'écriture simplifiée de la configuration électronique (ici  $1s^2 2s^2 2p^2$ ) ne fait pas apparaître cet état de stabilité maximum selon la règle de Hund.**

## II.3) Electrons de coeur / de valence; représentation de Lewis d'un atome

Les électrons de valence sont ceux dont le nombre quantique principal  $n$  est le plus élevé + ceux qui appartiennent à des sous-couches en cours de remplissage.



Les électrons de valence sont moins liés au noyau que les électrons de coeur.

La représentation de Lewis des atomes ne tient compte que des **électrons de valence**.

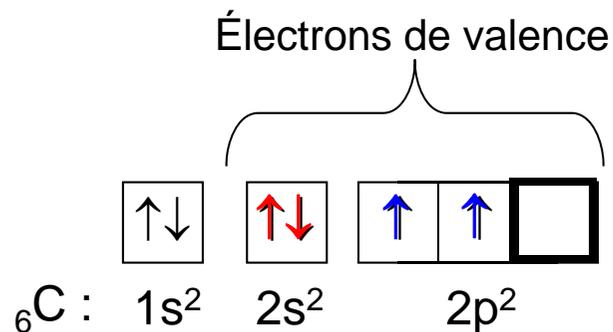
Les **électrons célibataires** sont représentés par des **points**.

Les **doublets d'électrons** sont représentés par des **tirets**.

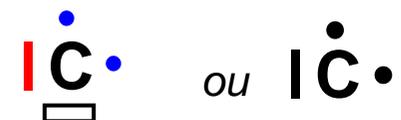
Une OA de valence vide peut-être représentée par un rectangle vide (= lacune électronique).

## II.3) Electrons de coeur / de valence ; représentation de Lewis

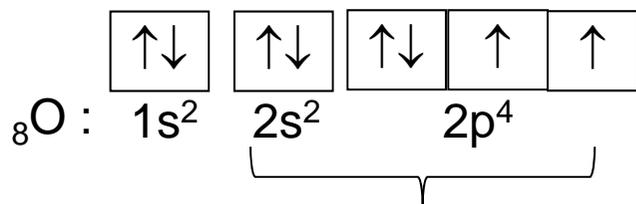
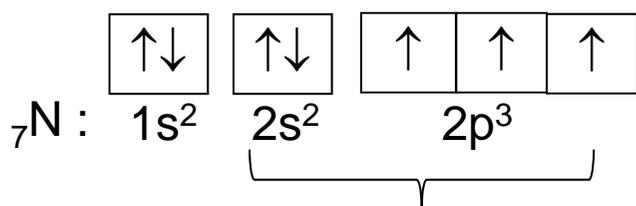
### exemples de représentation de Lewis:



Représentation de Lewis du carbone dans son état fondamental :



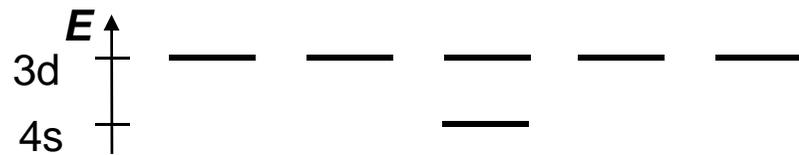
*Remarque* : Autre représentation de Lewis pour le carbone :



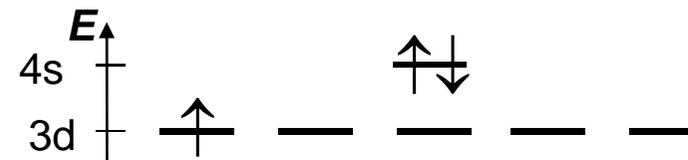
## II.4) Exceptions aux règles de remplissage

### i) Limite à la règle de Klechkovski : inversion des sous-couches 4s et 3d

OA « vides » : Règle de Klechkovski



Présence d'au moins un électron 3d

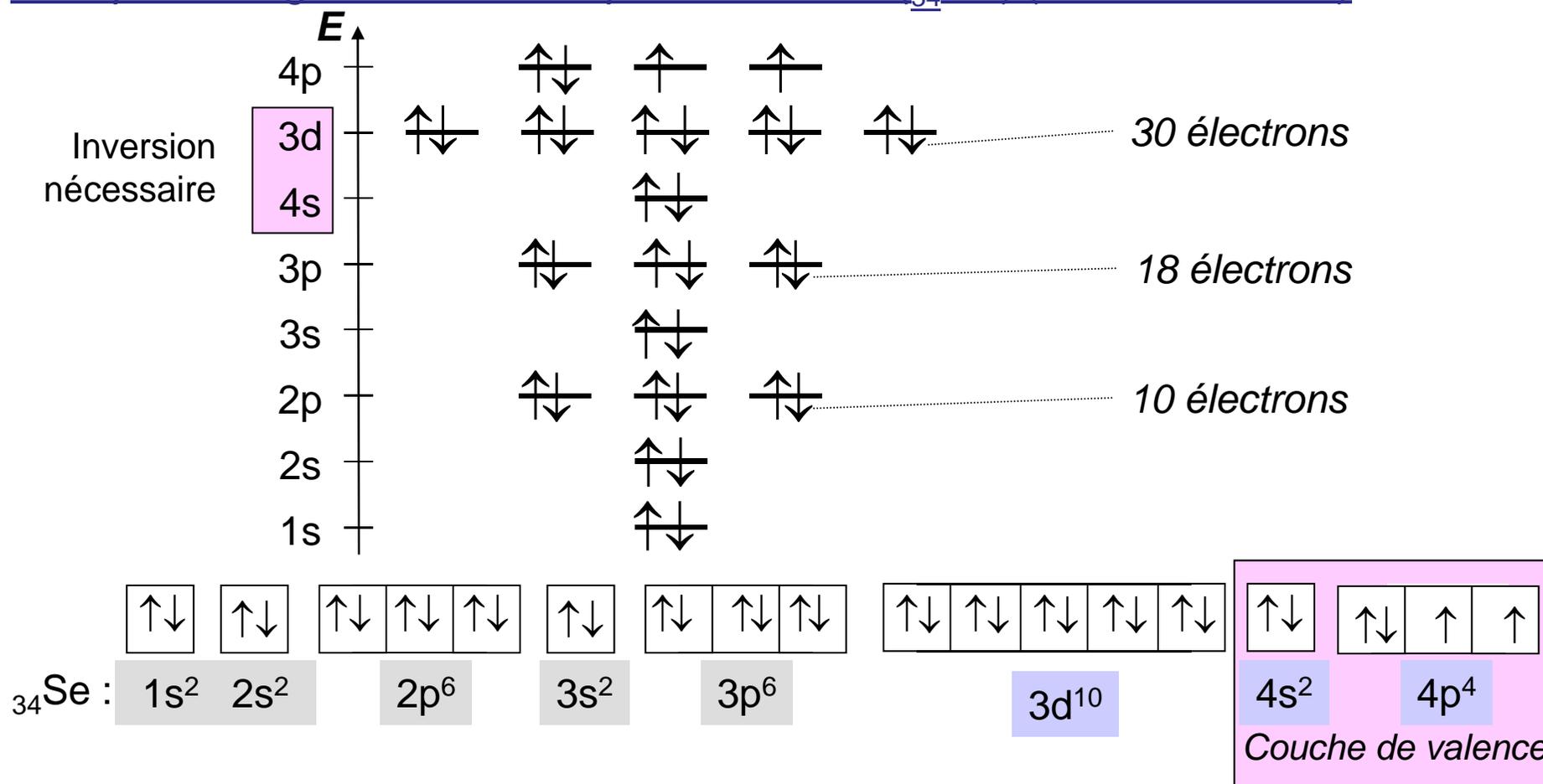


Attention : la sous-couche 4s possède bien ses 2 électrons même si la sous-couche 3d n'est pas complète

L'inversion est identique pour les sous-couches  
5s et 4d,  
(puis 6s et 4f,  
puis 7s et 5f, etc.)

## II.4) Exceptions aux règles de remplissage

Exemple : configuration électronique du sélénium ( $_{34}\text{Se}$ ) (état fondamental)



Représentation de Lewis du sélénium dans son état fondamental :  $\text{I} \underset{\cdot}{\text{Se}} \cdot$

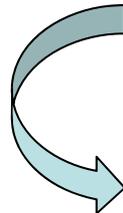
## II.4) Exceptions aux règles de remplissage

### ii) Stabilité particulière des sous-couches d à demi ou totalement remplies

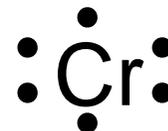
- **cas du chrome  $_{24}\text{Cr}$**

$$Z=24 \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^4 4s^2$$

Simplification de  
la notation



stabilité particulière des  
sous-couches d à demi  
remplies

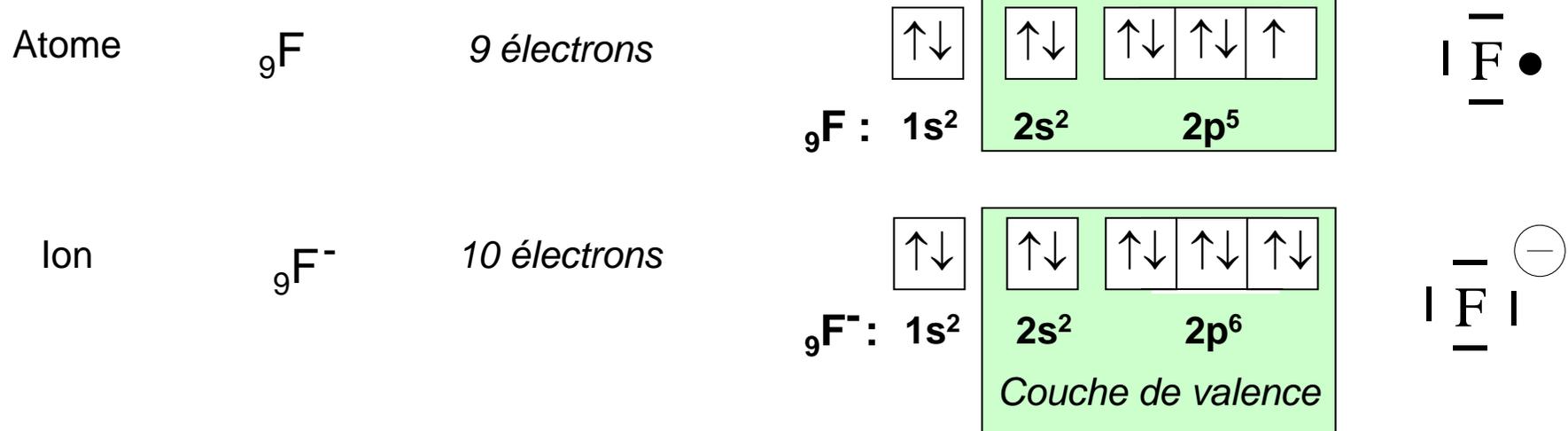


## II.5) Configuration électronique des ions à l'état fondamental

### i) Cas des anions

Ajout d'un ou plusieurs électrons à la structure de l'atome dans son état fondamental en respectant les règles de *Pauli*, *Klechkovski* et *Hund*

*Exemple* : ion fluorure  ${}_{9}\text{F}^{-}$

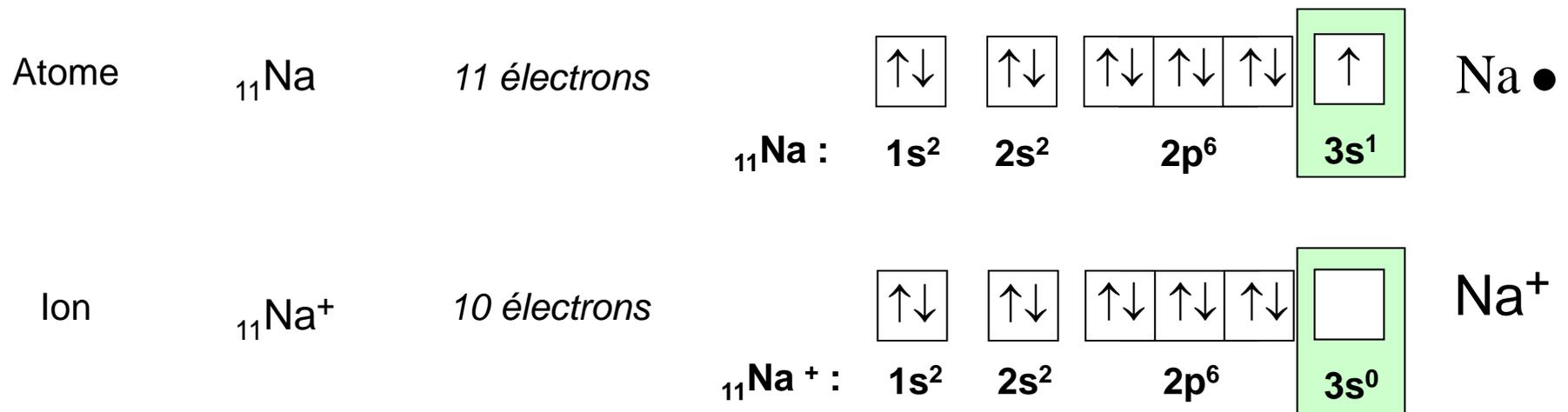


## II.5) Configuration électronique des ions à l'état fondamental

### ii) Cas des cations

Élimination d'un ou plusieurs électrons à la structure de l'atome dans son état fondamental en respectant les règles de *Pauli*, *Klechkovski* et *Hund*

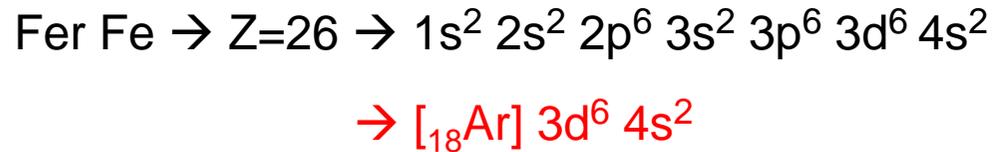
*Exemple* : ion sodium :  ${}_{11}\text{Na}^+$



## II.5) Configuration électronique des ions à l'état fondamental

### iii) Cations des métaux de transition

Exemples : ions fer :  ${}_{26}\text{Fe}^{2+}$  et  ${}_{26}\text{Fe}^{3+}$



Conséquence

La sous-couche 4s « se vide » avant la sous-couche 3d.



Raisonnement identique pour les composés avec des électrons dans leur sous-couche 4d, 4f ou 5f. On vide d'abord la sous-couche 5s, 6s ou 7s.

# CQFR

Effet écran

I) Fondamental → savoir donner l'ordre énergétique des sous-couches grâce au « moyen mnémotechnique ».

**Paragraphe très important.**

II)

Savoir faire...

→ savoir donner la configuration électronique d'un élément et d'un ion, leur représentation de Lewis.

# Exercices

**Question 1.** Soient les espèces suivantes :

phosphore  $_{15}\text{P}$   
soufre  $_{16}\text{S}$   
chlore  $_{17}\text{Cl}$  et ion chlorure  $_{17}\text{Cl}^-$   
calcium  $_{20}\text{Ca}$   
scandium  $_{21}\text{Sc}$   
cobalt  $_{27}\text{Co}$  et ion cobalt (II)  $_{27}\text{Co}^{2+}$   
germanium  $_{32}\text{Ge}$   
rubidium  $_{37}\text{Rb}$   
ruthénium  $_{44}\text{Ru}$  et ion ruthénium (IV)  $_{44}\text{Ru}^{4+}$   
iode  $_{53}\text{I}$

Donner la configuration électronique de ces espèces dans leur état fondamental, ainsi que leur nombre d'électrons de valence.

Donner des représentations de Lewis en accord avec les règles de remplissage.

**Question 2.** Combien de doublets d'électrons, d'électrons célibataires et de lacunes électroniques font apparaître les représentations de Lewis dans leur état fondamental du phosphore  $_{15}\text{P}$ , du soufre  $_{16}\text{S}$ , du germanium  $_{32}\text{Ge}$  et de l'iode  $_{53}\text{I}$ ?

# Exercices

## Question 1.

$_{15}\text{P}$  :  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$  ( autre notation possible (cf. ch3) :  $[_{10}\text{Ne}] 3s^2 3p^3$  )  
 Nv = 5 électrons de valence (électrons des sous-couches en rouge)

$_{16}\text{S}$  :  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$  ( ou  $[_{10}\text{Ne}] 3s^2 3p^4$  ) ; Nv = 6

$_{17}\text{Cl}$  :  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$  ( ou  $[_{10}\text{Ne}] 3s^2 3p^5$  ) ; Nv = 7

$_{17}\text{Cl}^-$  :  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$  ( ou  $[_{10}\text{Ne}] 3s^2 3p^6$  ) ; Nv = 8

$_{20}\text{Ca}$  :  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2$  ( ou  $[_{18}\text{Ar}] 4s^2$  ) ; Nv = 2

$_{21}\text{Sc}$  :  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^1 4s^2$  ( ou  $[_{18}\text{Ar}] 3d^1 4s^2$  ) ; Nv = 3

$_{27}\text{Co}$  :  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^7 4s^2$  ( ou  $[_{18}\text{Ar}] 3d^7 4s^2$  ) ; Nv = 9

$_{27}\text{Co}^{2+}$  :  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^7 (4s^0)$  ( ou  $[_{18}\text{Ar}] 3d^7 (4s^0)$  ) ; Nv = 7

$_{32}\text{Ge}$  :  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$  ( ou  $[_{18}\text{Ar}] 3d^{10} 4s^2 4p^2$  ) ; Nv = 4

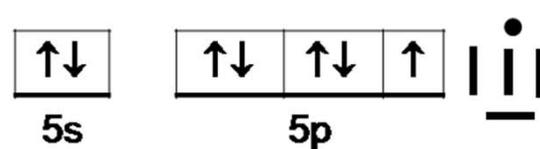
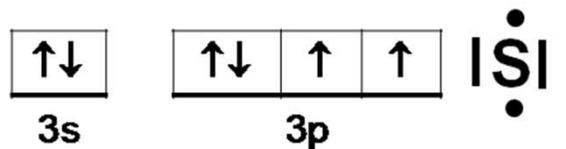
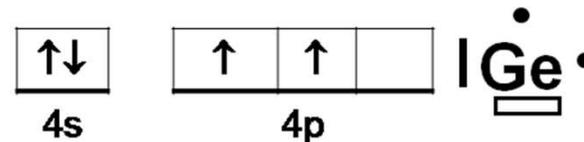
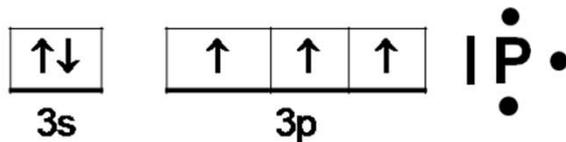
$_{37}\text{Rb}$  :  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 5s^1$  ( ou  $[_{36}\text{Kr}] 5s^1$  ) ; Nv = 1

$_{44}\text{Ru}$  :  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^6 5s^2$  ( ou  $[_{36}\text{Kr}] 4d^6 5s^2$  ) ; Nv = 8

$_{44}\text{Ru}^{4+}$  :  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^4 (5s^0)$  ( ou  $[_{36}\text{Kr}] 4d^4 (5s^0)$  ) ; Nv = 4

$_{53}\text{I}$  :  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^5$  ( ou  $[_{36}\text{Kr}] 4d^{10} 5s^2 5p^5$  ) ; Nv = 7

## Question 2.



# Mentions légales

L'ensemble de cette œuvre relève des législations française et internationale sur le droit d'auteur et la propriété intellectuelle, littéraire et artistique ou toute autre loi applicable.

Tous les droits de reproduction, adaptation, transformation, transcription ou traduction de tout ou partie sont réservés pour les textes ainsi que pour l'ensemble des documents iconographiques, photographiques, vidéos et sonores.

Cette œuvre est interdite à la vente ou à la location. Sa diffusion, duplication, mise à disposition du public (sous quelque forme ou support que ce soit), mise en réseau, partielles ou totales, sont strictement réservées à l'université Joseph Fourier (UJF) Grenoble 1 et ses affiliés.

L'utilisation de ce document est strictement réservée à l'usage privé des étudiants inscrits à l'Université Joseph Fourier (UJF) Grenoble 1, et non destinée à une utilisation collective, gratuite ou payante.