

V-1) Généralités sur les séismes :**V.1.1-Un séisme ou tremblement de terre :**

Le séisme est le résultat de la libération brusque d'énergie cumulée par les contraintes exercées sur les roches, le résultat de la rupture des roches en surface s'appelle une faille. Le lieu de la rupture des roches en profondeur se nomme le foyer.

Plus rares sont les séismes dus à l'activité volcanique ou d'origine artificielle (explosions par exemple). Il se produit de très nombreux séismes tous les jours, mais la plupart ne sont pas ressentis par les humains. Environ cent mille séismes sont enregistrés chaque année sur la planète. Les plus puissants d'entre eux comptent parmi les **catastrophes** naturelles les plus destructrices. La science qui étudie ces phénomènes est la sismologie (étudiée par des **Sismologues**) et l'instrument d'étude principal est le sismographe.

V.1.2- Causes du séisme :

- 1- Activités volcaniques (explosions, ascension des matières fondues).
- 2- Actions de l'eau souterraine.
- 3- Mouvements tectoniques (tension et rupture dans l'écorce causées par les mouvements des plaques).

V.1.3- Effets du séisme sur les structures :

- La translation du sol entraîne des oscillations forcées dans les structures portées.
- Les composantes horizontales H (qui sont dangereuses) produisent des oscillations latérales de flexion dans les 2 directions.
- Dissymétrie de rigidité ou de masse dans la structure qui produit des oscillations de torsion d'axe vertical.
- Les composantes verticales V produisent des vibrations longitudinales qui affectent la résistance des poteaux aux charges latérales et leur ductilité.

V-2) Introduction :

L'action du séisme se traduit par un brusque mouvement du sol, entraînant les fondations et les parties enterrées de l'ouvrage. Chaque partie de l'ouvrage est donc soumise à une force horizontale proportionnelle à sa masse avec des coefficients divers pour tenir compte des différents paramètres rentrant en ligne de compte les principaux paramètres sont :

- La zone de sismicité ;
- La forme en plan de l'ouvrage, la répartition des contreventements ;
- La distribution de la masse sur la hauteur ;
- La nature du terrain .

V-3) Objectif de l'étude dynamique :

L'objectif initial de l'étude dynamique d'une structure est la détermination des caractéristiques dynamiques propres de la structure lors de ses vibrations. Une telle étude pour notre structure telle qu'elle se présente, est souvent très complexe c'est pourquoi on fait souvent appel à des modélisations qui permettent de simplifier suffisamment les problèmes pour permettre l'analyse.

V-4) Méthode de calcul :

Selon le (RPA 99, version 2003art.4.1) le calcul des forces sismiques peut être mener suivant trois méthodes :

- Méthode d'analyse modale spectrale.
- Méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes.
- Méthode statique équivalente.

V.4.1-Méthode statique équivalente :**Principe :**

Dans cette méthode RPA propose de remplacer les forces réelles dynamique engendrées par un séisme, par un système de forces statiques fictives dont les effets seront identiques et considérées appliquées séparément suivant les deux directions définies par les axes principaux de la structure.

IV.4.2-Méthode d'analyse modale spectrale :**Principe :**

Par cette méthode, il est recherché pour chaque mode de vibration, le maximum des effets engendrés dans la structure par les forces sismiques représentées par un spectre de réponse de calcul. Ces effets sont par la suite combinés pour obtenir la réponse de la structure.

V.5) Choix de la méthode :

Dans notre cas la méthode statique équivalente n'est pas applicable puisque notre bâtiments ne vérifient pas toutes les conditions de l'article (4.1.2),D'où la méthode choisie sera **la méthode d'analyse modale spectrale.**

V.6) Modélisation :

La modélisation est la détermination d'un modèle, tenant compte le plus correctement possible de la masse et de la raideur de tous les éléments d'une structure, qui est par la suite une phase essentielle pour l'étude de la réponse au séisme.

Le choix du modèle représente une phase très importante de l'étude : plus il se rapproche de la réalité, plus l'étude ne sera précise. C'est également une phase délicate : un mauvais modèle peut s'écarter totalement de la réalité, ou encore l'incohérence des hypothèses peut apporter un degré de précision illusoire.

La modélisation doit rendre compte du comportement mécanique réel du bâtiment : il ne s'agit pas toujours de recopier simplement le plan du bâtiment, il faut surtout prendre en compte le comportement des éléments d'ossature pour les utiliser de la meilleure manière.

V.6.1- Modélisation des structures :

L'analyse dynamique nécessite toujours initialement de créer un modèle de calcul Représentant la structure. Ce modèle introduit ensuite dans un logiciel de calcul dynamique. **ETABS Non linéaire V9.7.0** est un logiciel de calcul des structures de génie civil (bâtiments, châteaux d'eau...) et des travaux publics (ponts, tunnels...), Il offre de nombreuses possibilités d'analyse des effets statiques et dynamiques avec des compléments de conception. Il permet aussi la vérification des structures en béton armé ou en charpente métallique, L'interface graphique disponible facilite, considérablement, la modélisation et l'exploitation des résultats.

V.6.2- Etapes de modélisation :

Les poutres et les poteaux sont modélisés par des éléments «Frame » Les poutres entre deux nœuds de même niveau « i », Les poteaux entre deux nœuds de différents niveaux « i et i+1 », Les voiles sont représentés par des éléments coques « Shell » à quatre nœuds, Chaque plancher a été modélisé par un diaphragme, Les planchers sont supposés indéformables dans leurs plans, La masse de chaque niveau est répartie sur les nœuds du niveau considéré, Pour tous les éléments non modélisés, leurs masses sont calculées et réparties sur les nœuds.

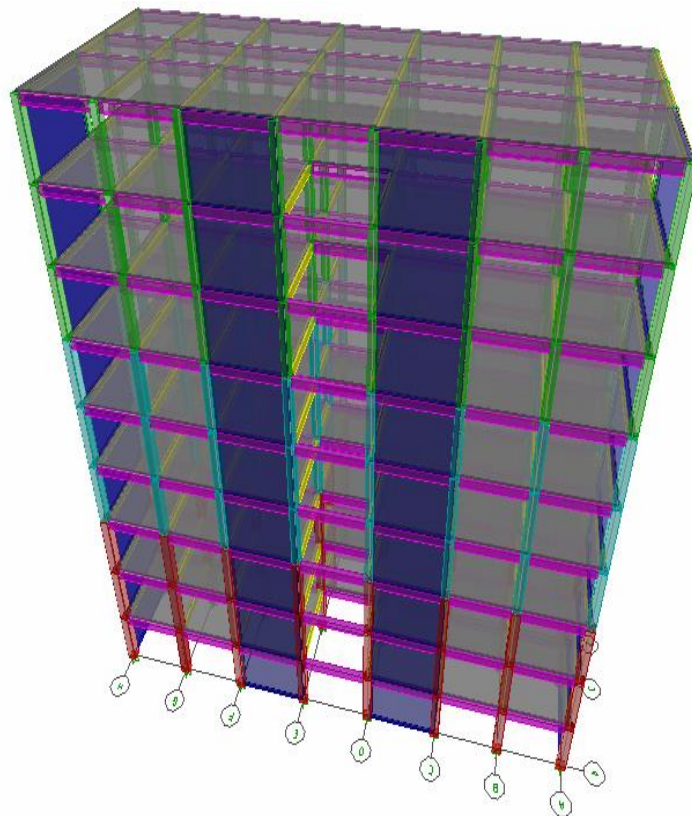


Figure V-1 :La structure sur le « Etabs »

V.6.3- L'analyse :

Après la modélisation de la structure et la distribution des masses et des chargements ainsi que la définition des combinaisons de charges, on passe à l'analyse.

Etabs offre les possibilités d'analyses suivantes :

- Analyse statique linéaire.
- Analyse P-Delta.
- Analyse statique non linéaire.
- Analyse dynamique

V.6.4- Analyse dynamique :

L'analyse dynamique disponible dans l'Etabs comporte l'analyse modale et l'analyse Spectrale.

V.6.5-Spectre de réponse de calcul :

Le RPA99/version 2003 (art.4.13) impose un spectre de réponse de calcul défini par la fonction suivante :

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1,25A \left(1 + \frac{T}{T_1}\right) \left(2,5\eta \frac{Q}{R} - 1\right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2,5\eta(1,25A) \times \left(\frac{Q}{R}\right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2,5\eta(1,25A) \left(\frac{Q}{R}\right) \left(\frac{T_2}{T}\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0 \text{ s} \\ 2,5\eta(1,25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) & T > 3.0 \text{ s} \end{cases}$$

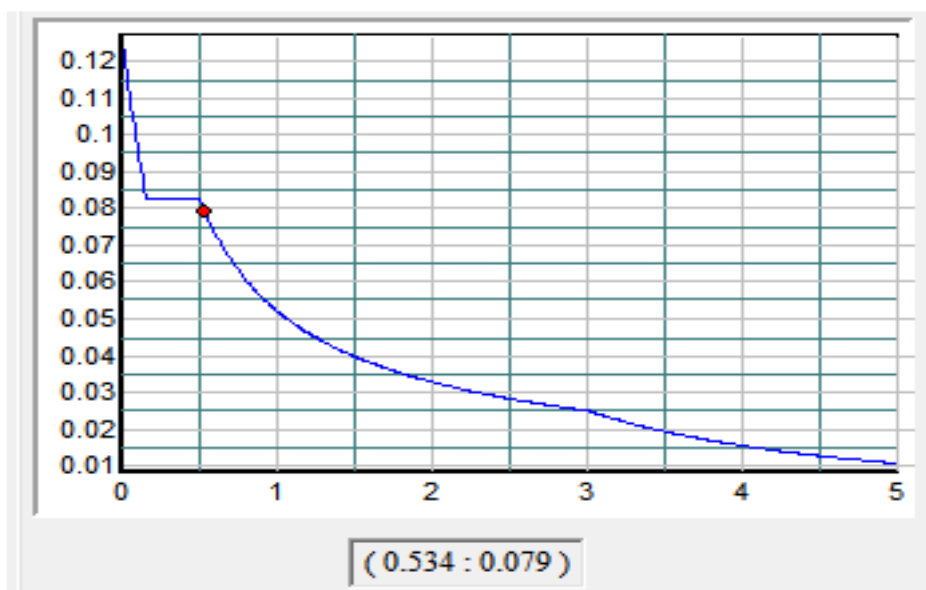


Figure V-2 : Spectre de réponse.

Avec : $\frac{\delta_a}{g}$ spectre de réponse de calcul.

Et :

A : Coefficient d'accélération de zone.

η : Facteur de correction d'amortissement (quand l'amortissement est différent de 5%)

$$\eta = \sqrt{7/(2 + \xi)} \geq 0,7$$

ξ : Pourcentage d'amortissement critique en fonction du matériau constitutif du type de structure et de l'importance des remplissages, il est donné par le tableau suivant :

Tableau V-1 : Pourcentage d'amortissement critique.

Remplissage	Portiques		Voiles ou murs
	Béton armé	Acier	Béton armé / Maçonnerie
Léger	6	4	10
Dense	7	5	

$$\xi = 07\% \begin{cases} \text{Portique en béton armé.} \\ \text{Remplissage dense.} \end{cases}$$

$$\eta = \sqrt{7/(2 + 7)} = 0,88 \geq 0,7$$

$$Q : \text{Facteur de qualité : } Q = 1 + \sum_i^6 P_q$$

P_q : est la pénalité à retenir selon que le critère de qualité Q est satisfait ou non, sa valeur est donnée par le tableau suivant :

Tableau V-2 : Pénalité à retenir pour le critère de qualité.

Critère q	P_q	
	Observé	Non observé
1. Condition minimales sur les filles de contreventement	0	0,05
2. Redondance en plan	0	0,05
3. Régularité en plan	0	0,05
4. Régularité en élévation	0	0,05
5. Contrôle de la qualité des matériaux	0	0,05
6. Contrôle de la qualité de l'exécution	0	0,1

Voici les critères à prendre en compte :

$$Q = 1 + (0 + 0 + 0,05 + 0,05 + 0,05 + 0,10) = 1,25$$

$$Q = 1,25$$

Régularité en plan :

T₁, T₂ : Périodes caractéristiques associées à la catégorie du site.

Tableau V-3 : Valeurs de T1 et T2.

Site	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
T _{1(Sec)}	0,15	0,15	0,15	0,15
T _{2(Sec)}	0,3	0,4	0,5	0,7

- Sol meuble ⇒ Site 3

$$\text{donc : } \begin{cases} T_1 = 0,15\text{sec} \\ T_2 = 0,5\text{sec} \end{cases}$$

Les valeurs du coefficient d'accélération de zone « A » sont révisées comme suit :

Tableau V-4 : Coefficient d'accélération de zone « A ».

Groupe	Zone			
	I	Iia	Iib	III
1A	0,15	0,25	0,3	0,4
1B	0,12	0,2	0,25	0,3
2	0,10	0,15	0,2	0,25
3	0,07	0,1	0,14	0,18

D'après le R.P.A 99 (version 2003), on a :

$$\begin{cases} \text{Zone sismique III} \\ \text{Grouped'usage 2} \end{cases} \Leftrightarrow (A = 0,25)$$

R : coefficient t de comportement de la structure.

R : coefficient t de comportement global de la structure donnée par le tableau (4.3)

contreventés mixte ⇒ R = 4.

Calcul de D :

$$T = C_T \cdot h_n^{3/4} \quad \text{d'ou : } \begin{cases} h_n = 27,88\text{m} \\ C_T = 0,050. \end{cases}$$

Donc : $T = 0,05 \times (27,88)^{3/4} = 0,60 \text{ sec} \dots\dots\dots(1)$

$l_x = 30,40\text{m}$

$l_y = 12,59\text{m}$

$$T = \begin{cases} 0,09 \times h_N / \sqrt{l_x} = 0,09(27,88) / \sqrt{30,40} = 0,45\text{Sec} \dots\dots\dots \text{Suivant (x - x)} \\ \dots\dots\dots(2) \\ 0,09 \times h_N / \sqrt{l_y} = 0,09(27,88) / \sqrt{12,59} = 0,70\text{Sec} \dots\dots\dots \text{Suivant (y - y)} \end{cases}$$

$T_x = \min \{ C_T \times h_N^{3/4}; 0,09 \times h_N / \sqrt{l_x} \} = \min(0,60; 0,45) = 0,45\text{Sec}$

$T_x = 0,45\text{Sec}$

$T_y = \min \{ C_T \times h_N^{3/4}; 0,09 \times h_N / \sqrt{l_y} \} = \min(0,60; 0,70) = 0,60\text{Sec}$

$T_y = 0,60\text{Sec}$

Le facteur d’amplification moyen : D

$$D = \begin{cases} 2,5 \times \eta \text{ ----- } 0 \leq T \leq T_2 \\ 2,5\eta \times \left(\frac{T_2}{T}\right)^{2/3} \text{ ---- } T_2 \leq T \leq 3\text{sec} \\ 2,5\eta \times \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \times \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \text{ -- } T \geq 3\text{sec} \end{cases}$$

Avec :

T_2 : Période caractéristique associée à la catégorie du site donnée par le tableau (4-7 ; RPA 99 V2003)

(Site S_3) $\Leftrightarrow T_2 = 0,50\text{Sec} \rightarrow T_2 \leq T \leq 3\text{sec} \Rightarrow D_x = 2,5 \eta \left(\frac{T_2}{T_x}\right)^{2/3} = 2,5 \times 0,88 \times \left(\frac{0,5}{0,45}\right)^{2/3} = 2,36$

Donc : $D_x = 2,36$

$T_2 \leq T \leq 3\text{sec} \Rightarrow D_y = 2,5\eta \left(\frac{T_2}{T_y}\right)^{2/3} = 2,5 \times 0,88 \times \left(\frac{0,5}{0,6}\right)^{2/3} = 1,95$

Donc : $D_y = 1,95$

On a : $V = \frac{A \cdot D \cdot Q}{R} \cdot W$

$$V_x = \frac{A.D_x.Q}{R} . W_t = \frac{0,25 \times 2.36 \times 1,25}{4} \times 41883.1 = 7394.98 \text{ KN}$$

$$V_y = \frac{A.D_y.Q}{R} . W_t = \frac{0,25 \times 1,95 \times 1,25}{4} \times 41883.1 = 6380.62 \text{ KN}$$

Calcul de poids total de la structure W_t :

La valeur w à prendre en compte est égale à la somme des poids W_i calculés à chaque niveau i de la structure. D'après le (RPA 99/v.2003) le poids total de la structure :

$$W = \sum W_i$$

Avec: $W_i = G_i + \beta P_i$

G_i : Poids des charges permanentes et à celle des équipements fixes éventuellement solidaires de la structure.

P_i : Charge d'exploitation.

β : Coefficient de pondération fonction de la nature et de la durée de la charge d'exploitation, le coefficient β est donné par le tableau (4 – 5)(RPA 99/v.2003)

Tableau V-5: Valeurs du coefficient de pondération β

Cas	Type d'ouvrage	β
1	Bâtiments d'habitation, bureaux ou assimilés	0,20
2	Bâtiments recevant du public temporairement :	
	- Salles d'exposition, de sport, lieux de culte, salles de réunions avec places debout.	0,30
	- salles de classes, restaurants, dortoirs, salles de réunions avec places assises	0,40
3	Entrepôts, hangars	0,50
4	Archives, bibliothèques, réservoirs et ouvrages assimilés	1,00
5	Autres locaux non visés ci-dessus	0,60

Le tableau suivant résume le poids en (KN) aux différents niveaux :

$$S = 382,74\text{m}^2$$

Tableau V.6 : Détermination des poids des différents niveaux W (KN).

Eléments	Poids (KN)	R.D.C-2 ^{er} niveau	3 ^{ème} - 5 ^{ème} niveaux	6 ^{ème} - 7 ^{ème} niveaux	Terrasse
Acrotère	$G_a \times \sum l_i$	---	---	---	$3,55 \times 85,98$ = 305,23
Plancher	$G \times S$	1917,53	1917,53	1917,53	$6,48 \times 382,74$ = 2506,20
Poteaux	$n \times b \times h \times \gamma_b \times h_t/2$	RDC= 646 1er,2eme =612	495,72	391,68	$32 \times (0,40)^2 \times 25 \times 1,53$ = 195,84
Poutre principale	$b \times h \times \gamma_b \times \sum l$	227,38	228,98	230,58	230,58
Poutre secondaire	$b \times h \times \gamma_b \times \sum l$	271,64	273,24	274,84	274,84
Murs extérieurs	$0,8 \times G_m \times (h_t/2) \times \sum l$	RDC=639,86 1er,2eme= 606,18	606,18	606,18	$0,8 \times G_m \times h_t/2 \times \sum L$ = 303,09
Murs voiles	$b \times h \times \gamma_b \times \sum l$	RDC=404.4 1er,2eme= 358.56	358.56	358.56	206.24
Escaliers	$(G_v \times S_v + G_p \times S_p)$	80,25	80,25	80,25	-----
Charge permanente	$\sum G_i$	5763,80	3960.46	3859.62	3995.98
Charge d'exploitation	$P = Q \times S_t$	574,11	574,11	574,11	382,74
Poids total	$G + \beta \times P$	5878.62	4075.28	3974.44	4072.52

Tableau-III-7 : poids total de la structure

Niveau	W(KN)
Terrasse	4072.52
7	3974.44
6	3974.44
5	4075.28
4	4075.28
3	4075.28
2	5878.62
1	5878.62
RDC	5878.62
TOTAL	41883.1

V-6-2-Définition des masses :

On définit chaque masse ou moment d'inertie massique affectée aux nœuds de chaque niveau

$$D'où: I_M = \frac{M}{S} (I_{xg} + I_{yg})$$

IM : inertie massique (t.m²)

M : masse sismique qui égale au rapport W/g

W, le poids de chaque niveau i.

g : l'accélération de pesanteur 9,81.

S : surface du plancher.

I_{xg} : inertie du plancher suivant l'axe X.

I_{yg} : inertie du plancher suivant l'axe Y.

$$\begin{cases} XG = xg + 0,05L_{max} \\ YG = yg + 0,05L_{max} \end{cases}$$

V-7-Vérifications :**V-7-1-Vérifications de participation de la masse :**

Tableau-V-8-Participation massique cumulée

Mode	Période	UX	UY	SumUX	SumUY
1	0,68	0,00	69,49	0,00	69,49
2	0,62	62,79	0,00	62,79	69,49
3	0,47	6,87	0,00	69,65	69,49
4	0,16	0,00	17,61	69,65	87,10
5	0,15	17,42	0,00	87,07	87,10
6	0,11	0,98	0,00	88,05	87,10
7	0,07	0,00	6,48	88,05	93,57
8	0,07	6,10	0,00	94,15	93,57
9	0,05	0,19	0,00	94,34	93,57
10	0,04	0,00	3,09	94,34	96,66
11	0,04	2,72	0,00	97,06	96,66
12	0,03	0,00	0,00	97,06	96,66

Le sens (X): $\sum \alpha_x = 97,06\% > 90\%$ Condition vérifiée.

Le sens (Y): $\sum \alpha_y = 96,66\% > 90\%$ Condition vérifiée.

V-7-2-Vérification de la période fondamentale de la structure :

D'après résultats obtenus par ETABS :

Le premier (01) mode de vibration donne une valeur de période égale a 0,68 sec

On doit vérifier que la période dynamique ne doit pas être supérieure à la majoration de 30% de période statique fondamental (T)

Donc :

$$T_{\text{calculé}} = 0.68 \text{ sec} < T_{\text{empirique}} = 1,30T = 1,30 \times 0.60 = 0,78 \text{ sec} \dots \dots \dots \text{condition vérifiée.}$$

V-8-Calcul de l'effort tranchant :

$$V = \frac{A.D.Q}{R} . W$$

$$\Rightarrow D = 2,5\eta \left(\frac{T_2}{T} \right)^{\frac{2}{3}} = 2,5 \times (0,88) \times \left(\frac{0,50}{0,77} \right)^{\frac{2}{3}} = 1.65$$

Donc :

$$V = \frac{A.D.Q}{R} . W = \frac{0,25 \times 1.65 \times 1,25}{4} \times 41883.1 = 5399 \text{ KN}$$

On doit vérifier que la résultante des forces sismiques à la base «**Vt**» obtenue par combinaison des valeurs modales ne doit pas être inférieure à **80%** de la résultant des forces sismiques déterminée par la méthode statique équivalente.

V-8-1-Sens longitudinal :

$V_{dx} = 7177.57 \text{ KN} > 80\% V_{st} = 80\% \cdot 5399 = 4319.2 \text{ KN}$ Condition vérifiée.

V-8-2-Sens transversal :

$V_{dy} = 6167.5 \text{ KN} > 80\% V_{st} = 80\% \cdot 5399 = 4319.2 \text{ KN}$ Condition vérifiée.

V-9-Justification Vis A Vis Des déformations :

Le déplacement horizontal à chaque niveau "k" de la structure est calculé comme suit

$$\delta_k = R \delta_{ek}$$

δ_{ek} : déplacement dû aux forces sismiques **F_i** (y compris l'effet de torsion)

R : coefficient de comportement

Le déplacement relatif au niveau "k" par rapport au niveau "k-1" est égal à :

$$\Delta_k = \delta_k - \delta_{k-1}$$

Les déplacements relatifs latéraux d'un étage par rapport aux étages qui lui sont adjacents ne doivent pas dépasser 1.0% de la hauteur de l'étage.

Tableau- V-9-Les déplacements relatifs inter étages

		Sens x-x			Sen y-y			
Niveau	Hauteur [m]	δ_{ek} [cm]	δ_k [cm]	Δ_k [cm]	δ_{ek} [cm]	δ_k [cm]	Δ_k [cm]	$\Delta_k \leq \overline{\delta_k}$
8	3.06	0,009	0.045	0.005	0,010	0.05	0.005	vérifiée
7	3.06	0,008	0.04	0.001	0,009	0.045	0.005	vérifiée
6	3.06	0,006	0.03	0.005	0,008	0.04	0.005	vérifiée
5	3.06	0,005	0.025	0.005	0,006	0.03	0.005	Vérifiée
4	3.06	0,004	0.02	0.005	0,005	0.025	0.001	Vérifiée
3	3.06	0,003	0.015	0.005	0,003	0.015	0.005	Vérifiée
2	3.06	0,002	0.01	0.005	0,002	0.01	0.005	Vérifiée
1	3.06	0,001	0.005	0.003	0,001	0.005	0.003	Vérifiée
RDC	3.40	0,0004	0.002	0.002	0,004	0.002	0.002	vérifiée