

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

CENTRE UNIVERSITAIRE MOHAMED BOUDIAF
M'SILA

INSTITUT DE GENIE CIVIL

ETUDE CORRELATIVE DES FLUCTUATIONS DES MESURES DE CONTROLE DU CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL ORDINAIRE.

THESE DE MAGISTER ETUDIEE PAR :
Monsieur NOURI Liamine

Année : 2001

Président du jury:

AYADAT Tahar

Maître de conférences.

Rapporteur :

M. BIBI Mekki

Maître de conférences.

Membres du jury :

BENCHEIKH Mohamed

Maître de conférences.

KHEMISSA Mohamed

Maître assistant chargé de cours.

RAHMOUNI Zine El Abidine.

Maître assistant chargé de cours.

REMERCIEMENTS

Les encouragements de la part de mes collègues enseignants sont la principale raison qui m'a permis de mener à terme ce travail.

La disponibilité de monsieur BIBI Mekki, maître de conférence à l'Institut de Génie Civil, m'a été d'une grande aide mais ne diminue en rien celle de messieurs :

- RAHMOUNI Zine El Abidine, directeur adjoint chargé de la post-graduation et de la recherche scientifique du Centre Universitaire ;
- BENCHEIKH Mohamed, maître de conférence à l'Institut de Génie Civil ;
- SAFER Smail, directeur de la post-graduation de l'Institut de Génie Civil ;
- KHEMISSA Mohamed, maître assistant chargé de cours à l'Institut de Génie Civil ;

Une pensée particulière à monsieur AYADAT Tahar, président du conseil scientifique de l'Institut de Génie Civil, pour la confiance qu'il m'a témoignée.

Les membres du jury, les correcteurs, les membres du conseil scientifique, monsieur le Directeur du Centre Universitaire ne sauraient me tenir rigueur si je ne les cite nommément, qu'ils trouvent ici tous mes remerciements.

L. NOURI

TABLE DE MATIERES

INTRODUCTION	p 5
Chapitre 1	p 7
COMPOSITION ET DURCISSEMENT DU CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL.	
1.1 Composition chimique et minéralogique du ciment Portland artificiel.	p 7
1.2 Méthode de détermination de la composition minéralogique du ciment Portland	p 9
1.3 Conclusion.	p 12
1.4 Hydratation du ciment Portland artificiel.	p 12
1.4.1 Le silicate de calcium hydraté ou tobermorite.	p 13
1.4.2 L'Aluminate tricalcique hydraté et l'action du gypse.	p 14
1.5 Prise et fausse prise du ciment Portland.	p 16
1.6 Finesse du ciment Portland.	p 17
1.7 Résistance mécanique du gel de ciment.	p 20
1.7.1 Considérations générales.	p 20
1.7.2 Influence des composants minéralogiques sur la résistance du ciment.	p 21
1.8 Eau retenue dans la pâte de ciment.	p 22
1.9 Contrôle du ciment Portland.	p 23
1.9.1 Essais sur poudre anhydre.	p 23
1.9.1.1 Masse volumique.	p 23
1.9.1.2 Granulométrie.	p 23
1.9.1.3 Surface spécifique.	p 23
1.9.1.4 Perte au feu.	p 23
1.9.1.5 Résidus insolubles.	p 23
1.9.1.6 Composition chimique.	p 23
1.9.2 Essais sur pâte pure.	p 23
1.9.2.1 Essai de consistance.	p 23
1.9.2.2 Essai de prise.	p 24
1.9.2.3 Variation de volume.	p 24
1.9.3 Essais sur mortier.	p 24
Chapitre 2	p 26
ANALYSE DES DONNEES	
2.1 Introduction à l'analyse des données.	p 26
2.1.1 Notions de statistiques.	p 26
2.1.2 L'inertie en analyse de données.	p 27
2.1.3 Calcul dual.	p 28
2.2 Méthodes d'analyse des données.	p 28
2.2.1 La corrélation ou régression multiple.	p 28
2.2.2 Régression pas à pas.	p 30
2.2.3 Analyse factorielle de correspondance.	p 30
2.2.3.1 Tableaux de contingence et tableaux de Burt .	p 30
2.2.3.2 Notion de lien.	p 31
2.2.3.3 L'analyse factorielle des correspondances -AFC.	p 32

2.2.4 Propriétés et interprétation de l'analyse factorielle de correspondance.	p 32
2.2.4.1 Equivalence distributionnelle.	p 32
2.2.4.2 Lien et χ^2 - Critère β - Degré de liberté.	p 33
2.2.4.3 Variables scalées - Cheminements.	p 33
2.2.4.4 Interprétation des nuages de points.	p 33
2.2.5 Autres méthodes d'analyse de données.	p 35
2.2.5.1 Analyse en composantes principales - ACP.	p 35
2.2.5.2 Analyse discriminante - AD.	p 35
2.2.5.3 L'analyse de variance - AV.	p 36
2.2.5.4 L'analyse de proximités.	p 37
2.2.5.5 L'analyse canonique.	p 38
2.2.5.6 Aperçu sur d'autres méthodes d'analyse de données.	p 38
2.2.5.6.1 L'analyse des mesures conjointes.	p 38
2.2.5.6.2 Typologie, segmentation et classification.	p 39
2.2.5.6.2.1 Agrégation selon la variance.	p 39
2.2.5.6.2.2 Agrégation autour de centres de variables.	p 39
2.2.5.6.3 Analyse de préférence. Méthodes de classement.	p 40
2.3 Tableau récapitulatif.	p 41
 Chapitre 3	 p 42
MESURE ET ANALYSE DES CARACTERES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DU CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL ORDINAIRE.	
3.1 Mesures des caractéristiques physiques et chimiques du CPA .	p 42
3.2 Analyse comparatives des mesures.	p 50
3.2.1 Analyse en composantes principales.	p 50
3.2.2 Interprétation des résultats de l'analyse.	p 55
3.2.2.1 Mesures à la sortie du broyeur.	p 55
3.2.2.2 Mesures à l'expédition du ciment.	p 55
 Chapitre 4	 p 72
ETUDE DES CORRELATIONS ENTRE LES PARAMETRES RETENUS MESURES SUR LE CPA .	
4.1 Régression entre les variables tirées de l'analyse factorielle.	p 72
4.2 Résumé des résultats de corrélation.	p 123
 CONCLUSION.	 p 126
REFERENCES.	p 127

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES.

Chapitre 1

Tableau 1.1	Limites approximatives de la composition du ciment Portland artificiel.	p 8
Fig.1.4.1	Proportions d'hydratation des composés purs.	p 14
Fig.1.4.2	Exemple schématique de microstructure d'un clinker refroidi lentement.	p 16
Fig.1.5.1	Temps de prise du ciment Portland ordinaire à différentes températures relativement au temps de prise à 15°C.	p 17
Fig.1.6.1	Relation entre la résistance à la compression du béton et la finesse du ciment.	p 18
Fig.1.6.2	Perméamètre à air de Lea et Nurse.	p 19
Tableau 1.6.3	Exemple de valeurs de la surface spécifique donnée par les différentes méthodes.	p 20
Fig.1.7.2.1	Développement de la résistance des composants purs.	p 21
Fig.1.7.2.2	Effet d'un alcali sur la résistance accélérée du ciment.	p 22
Fig.1.8.1	Structure probable des silicates hydratés.	p 22
Fig.1.9.3.1	Relation entre les résistances du béton et du mortier pour un même rapport eau/ciment.	p 25

Chapitre 2

Fig. 2.2.4.4.1	Effet Guttman.	p 34
Fig. 2.2.4.4.2	Aspect d'un nuage de points sur le plan factoriel selon la distribution dans le tableau de contingence.	p 34
Fig. 2.2.4.4.2 a.		
Fig. 2.2.4.4.2 b.		
Fig 2.3.1	Classification des méthodes d'analyse multivariée.	p 41

Chapitre 3

Mesures broyeur.		p 44
Graphe 1 à 6.		
Mesures expédition.		p 47
Graphe 1 à 6.		
Analyse factorielle.		
Broyeur.		
Facteur1 vs facteur2.		p 51
Facteur1 vs facteur3.		p 52
Expédition.		
Facteur1 vs facteur2.		p 53
Facteur1 vs facteur3.		p 54
Interpretation.		
Broyeur.		p 57
Graphe 1 à 6.		
Expédition.		p 63
Graphe 1 à 9.		

Chapitre 4

Résumé corrélation.		
Tableau 4.2.1	Broyeur groupe1.	p 124
Tableau 4.2.2	Expédition groupe1.	p 124
Tableau 4.2.3	Broyeur groupe2.	p 125
Tableau 4.2.4	Broyeur groupe2.	p 125

Chapitre 1

COMPOSITION ET DURCISSEMENT DU CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL.

1.1 Composition chimique et minéralogique du ciment Portland artificiel.

Le ciment Portland artificiel s'obtient par broyage d'une roche artificielle, le clinker, à laquelle on mélange environ 5% de gypse (CaSO_4) destiné à régulariser la prise. Le plus souvent, on ajoute, lors du broyage, du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, des pouzzolanes et autres constituants secondaires. Le clinker est obtenu par cuisson vers 1450°C d'un mélange d'environ 80% de calcaire et 20% d'argile. Les constituants principaux sont donc la chaux (62-67%), la silice (19-25%), l'alumine (2-9%), l'oxyde ferrique (1-5%), l'oxyde de magnésium (0-1%) et les alcalis (0-1,5% de Na_2O et K_2O) [1,2].

Ces composants interagissent dans le four pour former une série de produits plus complexes et, à l'exception d'un faible résidu de chaux non combinée, appelée chaux libre, un état d'équilibre chimique est atteint. Cet équilibre n'est cependant pas conservé lors du refroidissement, la vitesse de refroidissement affecte le degré de cristallisation et la quantité de produit amorphe. Les propriétés de la phase vitrifiée amorphe diffèrent considérablement des composants cristallisés de composition chimique similaire. Le phénomène est encore plus complexe car, lors de la cuisson, les transformations sont améliorées grâce à l'apparition d'une phase liquide formée par l'oxyde ferrique Fe_2O_3 et l'alumine Al_2O_3 en parallèle à la phase solide cristalline.

Néanmoins, le ciment peut être considéré comme étant un gel en équilibre et les produits refroidis sont supposés reproduire l'équilibre existant à la température de clinkérisation. Cette hypothèse est, en pratique, utilisée pour le calcul de la composition des ciments commerciaux: la composition potentielle est déterminée à partir de la mesure des quantités d'oxydes présents dans le clinker.

En réalité les silicates présents dans le ciment ne sont pas des composés purs, mais contiennent des oxydes mineurs en solution solide. Ces oxydes ont des effets significatifs sur les arrangements atomiques, la forme cristalline et les propriétés hydrauliques des silicates.

Le calcul de la composition potentielle du ciment Portland est basé sur les travaux de R.H. Bogue et certains autres auteurs et est souvent connu sous l'appellation de composition de Bogue [3,4].

Les équations de Bogue donnent le pourcentage des quatre principaux composés minéralogiques du ciment à partir du pourcentage des différents composants chimiques. Avec les abréviations suivantes:

$\text{CaO} = \text{C}$, $\text{SiO}_2 = \text{S}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$,

La composition de Bogue est donnée par:

$\text{C}_3\text{S} = 4,07 \text{ C} - 7,60 \text{ S} - 6,72 \text{ A} - 1,43 \text{ F} - 2,85 (\text{SO}_3)$

$\text{C}_2\text{S} = 2,87 \text{ C} - 0,754 (\text{C}_3\text{S})$

$\text{C}_3\text{A} = 2,65 \text{ A} - 1,69 \text{ F}$

$\text{C}_4\text{AF} = 3,04 \text{ F}$.

Il est à noter que cette composition sous-estime la quantité de C_3S en surestimant la quantité de C_2S car d'autres oxydes remplacent la chaux dans C_3S . Les oxydes tels que MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O et Na_2O , appelés composants mineurs, se retrouvent en un faible pourcentage du poids de ciment. Deux des composants mineurs ont une importance particulière, les oxydes de sodium et de potassium, Na_2O et K_2O connus sous l'appellation d'alcalis; d'autres alcalis existent également dans le ciment. La quantité des alcalis et Mn_2O_3 peut être rapidement déterminée par spectrophotographie.

La composition minéralogique du ciment a été essentiellement établie à partir des études sur l'équilibre de phase des systèmes ternaires C-A-S et C-A-F et du système quaternaire C-C₂S-C₅A₃-C₄AF et autres ceci à différentes températures. En dehors des méthodes d'analyse chimique,

la composition réelle du clinker peut être déterminée par examen au microscope optique de préparations sous forme de poudre ou par la mesure de l'indice de réfraction. La proportion des deux silicates peut être mesurée au micromètre de Shands par transmission de lumière à travers une fine lamelle-échantillon. Un examen de sections brutes ou polies en lumière réfléchie ou transmise peut également donner un certain nombre de renseignements. D'autres méthodes telles que l'utilisation de la diffraction des rayons X pour l'identification des phases cristallines de même que l'étude de la structure cristalline de certaines phases et l'analyse à différentes températures, peuvent être utilisées mais nécessitent généralement des étalonnages complexes [5]. Un nouveau progrès a été possible par l'utilisation du microscope électronique.

Il en est de même pour l'estimation de la composition du ciment qui a bénéficié de nouvelles méthodes rapides telles que la fluorescence aux rayons X et la micro-analyse par sonde électronique. La diffractométrie aux rayons X, par exemple, est particulièrement pratique pour l'identification de la chaux libre CaO qui a un comportement différent de l'hydroxyde Ca(OH)_2 [6].

Le silicate tricalcique C3S qui est normalement le composant que l'on retrouve en proportion importante dans le ciment apparaît sous forme de grains incolores de dimensions uniformes. Par refroidissement au-dessous de 1250°C , il se décompose lentement mais, si le refroidissement est assez rapide, il demeure inchangé et est relativement stable à la température ordinaire.

Le silicate bicalcique C2S peut se retrouver sous trois et parfois même sous quatre formes différentes. a-C2S que l'on rencontre à hautes températures prend la forme b à environ 1450°C . b-C2S subit une seconde inversion à 670°C mais à la vitesse de refroidissement des ciments commerciaux b-C2S est préservé dans le clinker. Cette dernière forme apparaît en grains ronds, généralement jumelés.

L'aluminate tricalcique forme des cristaux rectangulaires vitrifiés, il constitue une phase interstitielle amorphe.

L'alumino-ferrite tétracalcique C4AF est en fait une solution solide de composition variant de C2F à C6A2F, mais la description sous forme de C4AF est une simplification utile en pratique.

Les quantités réelles des différents composants varient considérablement d'un ciment à un autre et différentes quantités peuvent être obtenues en faisant varier les proportions d'une manière adéquate. Les compositions limites généralement constatées pour le ciment Portland sont données par la table 1.1 [6].

Oxyde	Proportion en %
CaO	60-67
SiO_2	17-25
Al_2O_3	3-8
Fe_2O_3	0,5-6,0
MgO	0,1-4,0
Alcalis	0,2-1,3
SO_3	1-3

Tableau 1.1 Limites approximatives de la composition du ciment Portland artificiel.

Lors de l'analyse chimique, deux essais complémentaires sont utilisés. Les résidus insolubles sont déterminés par traitement à l'acide chlorhydrique et permettent de connaître la contamination du ciment essentiellement par les impuretés dans le gypse; la perte au feu montre l'étendue de la carbonatation et de l'hydratation de la chaux libre et de la magnésie libre due à l'exposition du ciment à l'air libre.

1.2 Méthode de détermination de la composition minéralogique du ciment Portland [7].

Nous présentons dans ce qui suit la justification des principaux coefficients qui apparaissent dans les équations de Bogue en apportant certaines précisions relatives au calcul des proportions en C3A et C2F dans le cas où ces composés apparaissent dans la composition du clinker.

Le coefficient de saturation de la chaux est défini par la relation suivante:

$$K_s = \frac{\text{CaO} - (1,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,35 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + 0,7 \text{ SO}_3)}{2,8 \text{ SiO}_2}$$

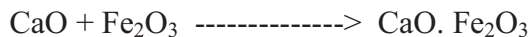
La quantité $1,65 \text{ Al}_2\text{O}_3$ représente la partie de chaux réagissant avec Al_2O_3 du ciment pour former C3A selon la formule:



La masse molaire de CaO étant 56 g et celle de Al_2O_3 102 g, 3 CaO représente 168 g qui réagissent avec 102 g de Al_2O_3 , soit en proportions, la quantité de CaO est:

$$\text{Quantité de CaO} = 168 / 102 \text{ Al}_2\text{O}_3 = 1,65 \text{ Al}_2\text{O}_3.$$

$0,35 \text{ Fe}_2\text{O}_3$ représente la quantité de chaux réagissant avec Fe_2O_3 pour former CF d'après la formule:

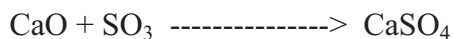


qui montre que 56 g de CaO se combinent à 160 g de Fe_2O_3 ; nous avons alors:

$$\text{quantité de CaO} = 56 / 160 \text{ Fe}_2\text{O}_3 = 0,35 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

Il est à noter que C4AF est en fait C3A + CF.

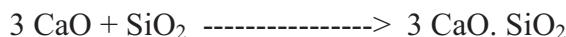
$0,7 \text{ SO}_3$ représente la partie de chaux dans CaSO_4 puisque:



soit 56 g de chaux 80 g de SO_3 ce qui permet d'écrire:

$$\text{Quantité de CaO} = 56 / 80 \text{ SO}_3 \text{ soit } 0,7 \text{ SO}_3.$$

La valeur $2,8 \text{ SiO}_2$ est en fait la partie de chaux qui réagit avec la silice pour former C3S, ce qui est décrit par la formule:



ce qui représente 3×56 g de CaO se combinant à 60 g de SiO_2 , nous pouvons donc écrire:

$$\text{Quantité de CaO} = 168 / 60 \text{ SiO}_2 \text{ ou } 2,8 \text{ SiO}_2.$$

Le numérateur de K_s , qui est donc $\text{CaO} - (1,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,35 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + 0,7 \text{ SO}_3)$ est alors la partie de chaux qui va réagir avec SiO_2 pour donner les principaux composants du ciment, C3S et C2S.

Le dénominateur de K_s représente la quantité de chaux qui serait utilisée s'il ne se formait que C_3S , ce qui donne $K_s = 1$ si $C_2S = 0$. En général C_3S et C_2S se forment simultanément et K_s est inférieur à 1. Nous obtenons dans ce cas deux parties pour SiO_2 :

S_1 : partie de SiO_2 dans C_2S ,

S_2 : partie de SiO_2 dans C_3S .

Il est évident que:

$$S = S_1 + S_2 \quad (1)$$

La quantité de chaux réagissant avec S_1 pour former C_2S est explicitée par la composition molaire de C_2S , soit:

$2 CaO \cdot SiO_2$ ce qui représente 2×56 g de CaO pour 60 g de SiO_2

quantité de $CaO = 112 / 60 SiO_2$ ou 1,9 S_1

Pour C_3S , nous avons:

$3 CaO \cdot SiO_2$

qui exprime que 3×56 g de CaO se lie à 60 g de SiO_2 , nous avons donc:

quantité de $CaO = 168 / 60 SiO_2$ donc 2,8 S_2

Le coefficient K_s ou degré de saturation en chaux devient alors:

$$K_s = \frac{1,9 S_1 + 2,8 S_2}{2,8 S_2}$$

Les réactions n'étant pas totales, nous pouvons adopter la simplification suivante:

$$K_s = \frac{2 S_1 + 3 S_2}{3 S_2} \quad (2)$$

Le rapport $p = \text{quantité d' } Al_2O_3 / \text{quantité de } Fe_2O_3 \text{ dans } C_4AF$ ou module alumino-ferrique a pour valeur:

$$p = 102 / 160 \quad \text{ou} \quad p = 0,64.$$

Nous pouvons distinguer alors trois cas en fonction de la valeur que prend le module p :

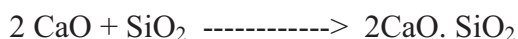
1- $p > 0,64$.

La quantité de SiO_2 , S étant donnée et K_s calculé, les relations (1) et (2) permettent d'écrire:

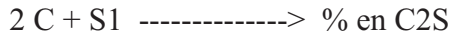
$$S_1 = 3 S (1 - K_s)$$

$$S_2 = S (3 K_s - 2).$$

a-La proportion en C_2S dans le ciment est définie par la réaction suivante:



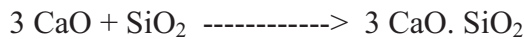
qui correspond à:



ou encore 60 g de SiO_2 donnent 172 g de C2S. La proportions en C2S est exprimée alors par:

$$\% \text{C2S} = 172 / 60 \text{ S1 ce qui équivaut à } \% \text{C2S} = 2,87.3.\text{S}(1-\text{Ks}).$$

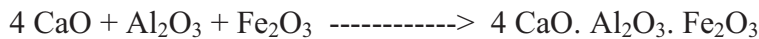
b-La proportion en C3S dans le ciment Portland est calculée à partir de la réaction:



qui exprime que 60 g de SiO_2 permettent d'obtenir 228 g de C3S, SiO_2 étant dans ce cas mesuré par S2. Nous avons alors:

$$\% \text{C3S} = 228 / 60 \text{ S2 , donc } \% \text{C3S} = 3,8.\text{S}(3\text{Ks}-2).$$

c-Le pourcentage en alumino-ferrite tétracalcique C4AF est défini par la réaction globale suivante:



ce qui correspond à:

$$4 \times 56 \text{ g} + 102 \text{ g} + 160 \text{ g} \text{ -----} \rightarrow 486 \text{ g.}$$

La proportion de C4AF relative à Fe_2O_3 est alors:

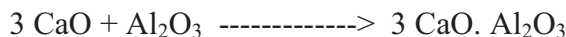
$$\% \text{ Al}_2\text{O}_3 = 102 / 160 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \text{ soit } \% \text{ Al}_2\text{O}_3 = 0,64 \text{ Fe}_2\text{O}_3.$$

La quantité restante est donc:

$$\% \text{ Al}_2\text{O}_3 \text{ restant} = \% \text{ Al}_2\text{O}_3 - 0,64 \text{ Fe}_2\text{O}_3.$$

Cette partie va servir à la formation de C3A.

d-Le calcul de la quantité de C3A est alors effectué selon la réaction:



$$\text{soit } 3 \times 56 \text{ g} + 102 \text{ g} \text{ -----} \rightarrow 270 \text{ g}$$

nous obtenons donc:

$$\% \text{ C3A} = \frac{270}{102} (\% \text{ Al}_2\text{O}_3 \text{ total} - 0,64 \text{ Fe}_2\text{O}_3).$$

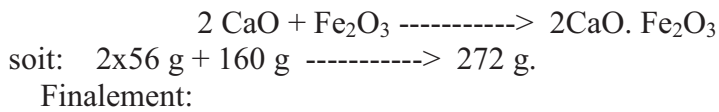
2- $p < 0,64$.

Le pourcentage de Fe_2O_3 par rapport à la quantité de Al_2O_3 dépensée pour la formation de C4AF est selon la formule donnée en 1-c:

$$160 / 102 \text{ Al}_2\text{O}_3 = 1,56 \text{ Al}_2\text{O}_3.$$

Il reste donc une quantité de Fe_2O_3 servant à la formation de C2F égale à la quantité de Fe_2O_3 totale diminuée de 1,56 fois la quantité d' Al_2O_3 .

La proportion en C2F dans le ciment Portland est définie à partir de la réaction:



$$\% \text{C2F} = \frac{272}{160} (\text{Fe}_2\text{O}_3 - 1,56 \text{ Al}_2\text{O}_3)$$

La teneur en C3S, C2S et C4AF est déterminée selon la méthode exposée en 1-.

3- $p = 0,64$.

Dans ce cas, le ciment contient uniquement les trois minéraux C3S, C2S et C4AF dont les teneurs sont calculées en 1-.

1.3 Conclusion.

Il convient, maintenant, de résumer les étapes de calcul qui représentent en fait un algorithme de détermination des composants minéralogiques en fonction des composants chimiques.

Résumé:

S : % SiO_2

A : % Al_2O_3

F : % Fe_2O_3

C : % CaO

B : % SO_3

$$1) \quad K_s = \frac{C - (1,65 A + 0,35 F + 0,7 B)}{2,8 S}$$

$$\begin{array}{l} 2) \quad \text{C2S} = 8,61 \cdot S \cdot (1 - K_s) \\ \quad \text{C3S} = 3,8 \cdot S \cdot (3 K_s - 2) \\ \quad \text{C4AF} = 3,04 \cdot F \end{array}$$

$$3) \quad p = A$$

a) Si $p = 0,64$

$$\text{C3A} = 0$$

$$\text{C2F} = 0$$

b) Si $p > 0,64$

$$\text{C3A} = 2,65 \cdot (A - 0,64 F)$$

$$\text{C2F} = 0$$

c) Si $p < 0,64$

$$\text{C3A} = 0$$

$$\text{C2F} = 1,7 \cdot (F - 1,56 A).$$

1.4 Hydratation du ciment Portland artificiel.

La réaction chimique entre le ciment et l'eau présente dans la pâte de ciment produit un corps ferme et dur, qui permet l'agglomération des particules constituant le béton ou le mortier avec un dégagement de chaleur.

Les réactions qui s'amorcent dès le début du gâchage et qui se poursuivent dans le temps sont réellement très complexes. Les constituants anhydres donnent naissance à des silicates et des aluminates de calcium hydratés, pratiquement insolubles dans l'eau d'où les phénomènes de prise et de durcissement en présence d'eau. En fait, il existe deux manières de réagir pour les composants présents dans le ciment avec l'eau. Une addition directe de molécules d'eau qui est la véritable réaction d'hydratation et une réaction d'hydrolyse.

Le Chatelier a été le premier à observer que les produits d'hydratation du ciment sont chimiquement semblables à ceux de l'hydratation des composés pris isolément dans les mêmes conditions. Ceci a été confirmé par Steinour [8], Bogue et Lerch [9] avec toutefois la possibilité que les produits des réactions peuvent eux-même interférer dans les réactions et même réagir avec les autres composants.

Différentes théories sur la prise des liants ont été émises mais aucune n'a été confirmée définitivement. Une hypothèse plausible est que les produits les hydrates forment une enveloppe qui croît intérieurement par l'action de l'eau qui traverse à partir de l'extérieur. Une seconde possibilité est la précipitation des silicates dissous qui traversent cette enveloppe pour former un dépôt extérieur. Une troisième explication possible est la précipitation de la solution colloïdale une fois les conditions de saturation atteintes.

Les réactions d'hydratation ne sont pratiquement jamais totales et se poursuivent dans le temps. Powers [10] a pu montrer qu'une hydratation complète dans les conditions normales est possible uniquement pour les particules de ciment inférieures à 50 μm ; une hydratation complète a pu être obtenue par broyage ininterrompu, en présence d'eau, pendant cinq jours.

Plusieurs travaux ont montré que la composition relative des différents composants du ciment ne varie pratiquement pas lors de l'hydratation [11]. Les principaux hydrates peuvent globalement être classés en silicates de calcium hydratés et en aluminates tricalciques hydratés. C4AF semble s'hydrater en aluminat tricalcique hydraté et en une phase amorphe, probablement $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Il est possible également qu'une quantité de Fe_2O_3 se retrouve dans la solution solide d'aluminat tricalcique hydraté.

L'évolution de l'hydratation du ciment peut être suivie par différents moyens tels que:

- la mesure de l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 présent dans la pâte;
- la chaleur dégagée par les réactions;
- la mesure de la variation de la masse volumique;
- la mesure de l'eau qui réagit chimiquement;
- la mesure du ciment non hydraté par analyse quantitative aux rayons X;
- ou indirectement par la variation de la résistivité de la pâte de ciment.

Plus récemment des techniques telles que la thermogravimétrie ou la diffraction des rayons X permettent une étude des réactions plus tôt que les techniques citées plus haut [12].

1.4.1 Le silicate de calcium hydraté ou tobermorite.

Le taux d'hydratation de C3S et C2S à l'état pur diffèrent considérablement (fig. 1.4.1).

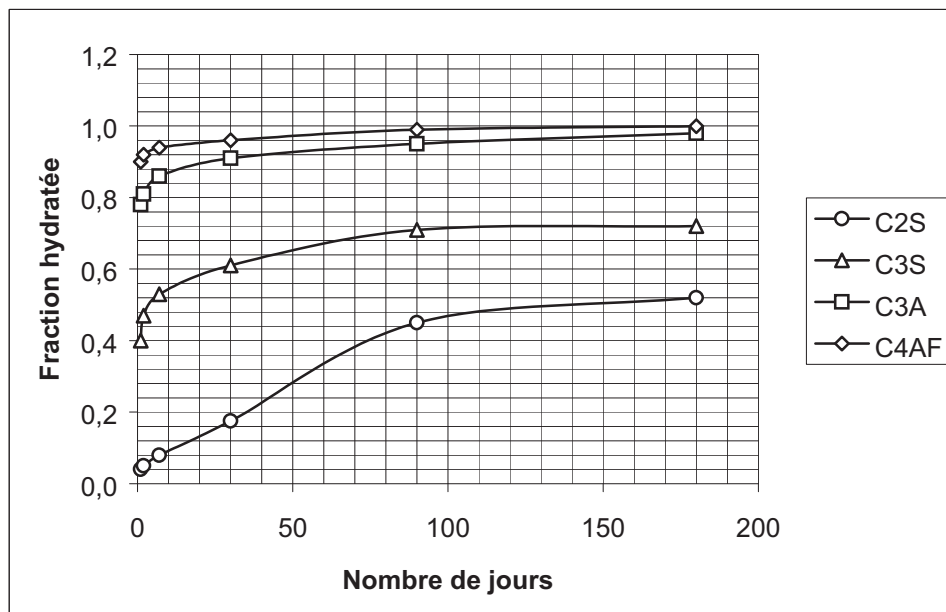


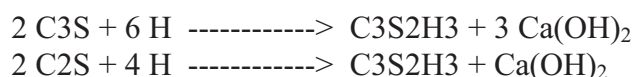
Fig.1.4.1 Proportions d'hydratation des composés purs.

Dans le ciment, les silicates de calcium contiennent une fraction d'impuretés composée d'oxydes. Le C3S contenant des impuretés est appelé alite, Jeffery [13] a donné comme formule possible $54\text{CaO} \cdot 16\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$. Les cristaux sont généralement polygonaux, la taille varie suivant la cuisson, de 10 à 50 mm (fig.1.4.2). C2S impur appelé bélite est constitué de silicate bicalcique, variété b (C2Sb) et d'impuretés telles que l'anhydride phosphorique P_2O_5 , l'oxyde de baryum BaO etc... Les cristaux ont souvent des formes arrondies, à macles multiples lisses ou striées; la taille varie également selon la cuisson, 30 mm en moyenne. Les impuretés ont un effet important sur les propriétés des silicates de calcium hydratés.

Quand l'hydratation a lieu en présence d'une quantité limitée d'eau, tel est le cas dans une pâte de ciment ou dans le béton, C3S subit une hydrolyse qui produit un silicate de calcium faiblement basique, de composition finale $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$; la chaux inutilisée se retrouvant sous la forme de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Il existe toujours une incertitude sur la possibilité que C3S et C2S fournissent en phase finale le même composé hydraté. Le produit final contient généralement de faibles quantités d'Al, de Fe, Mg et d'autres ions et fut appelé pendant une période, tobermorite à cause de la similitude de sa structure à un minéral de ce nom. En fait ceci est incorrect et cette description est actuellement rarement utilisée.

Dans l'hypothèse de la formation de $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ comme produit final de l'hydratation de C3S et C2S, les réactions peuvent s'écrire:



L'hydroxyde de calcium libéré par l'hydrolyse forme de minces plaques hexagonales de quelques dizaines de nm que l'on retrouve sous la forme de dépôt massif [6].

1.4.2 L'Aluminate tricalcique hydraté et l'action du gypse.

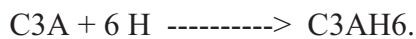
La quantité de C3A dans la plupart des ciments est relativement petite mais digne d'intérêt à cause de son comportement et de sa relation structurale avec les autres phases du

ciment. L'aluminate tricalcique hydraté forme un matériau interstitiel sombre, probablement mélangé à d'autres substances sous forme d'une solution solide (fig1.4.2).

C3A réagit violemment avec l'eau et forme rapidement une pâte rigide. Ce phénomène de prise instantanée est appelé flash set, afin de l'éviter, on ajoute du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ au clinker. Le gypse réagit avec C3A pour donner du sulfoaluminate de calcium $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ insoluble et éventuellement de l'aluminate tricalcique hydraté précédé par un composé métastable $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ qui se forme au dépens du sulfoaluminate [8]. Un pic de chaleur dégagée lors de la réaction observé lors des premières cinq minutes après le gâchage signifie qu'il y a formation directe d'aluminate de calcium hydraté et par conséquent les conditions pour que l'action du gypse ait lieu ne sont pas encore réalisées.

Il est établi que l'hydratation de C3A est retardée par l'hydroxyde de chaux libéré lors de l'hydrolyse de C3S [14]. Ceci est dû au fait que $\text{Ca}(\text{OH})_2$ réagit avec C3A et l'eau pour donner C4AH19 qui forme une couche protectrice sur la surface des grains non hydratés de C3A. Il est également possible que $\text{Ca}(\text{OH})_2$ diminue la concentration des ions aluminates de la solution et retarde ainsi l'hydratation de C3A.

La forme stable de l'aluminate de calcium hydraté ultime est probablement le cristal cubique C3AH6 mais il est également possible que C4AH12 cristallise d'abord sous une forme hexagonale pour donner finalement la forme cubique. La réaction globale approximative peut s'écrire:



La présence de C3A est souvent indésirable, il contribue faiblement ou pas du tout dans la résistance du ciment sauf à un âge précoce. Lorsque le ciment durci est attaqué par les sulfates, l'expansion due à la formation du sulfoaluminate de calcium à partir de C3A aboutit à un désordre de la pâte durcie et donc à sa rupture. Toutefois C3A est apprécié lors de la fabrication du ciment car il agit comme un flux, réduit la température de cuisson du clinker et facilite la combinaison de la chaux et de la silice; ces qualités sont également reconnues pour C4AF. Il est évident que sans une liquéfaction lors de la cuisson, les réactions seraient probablement incomplètes et l'on aboutirait à un ciment plus médiocre que celui contenant C3A.

La proportion de gypse ajoutée au clinker doit être surveillée avec attention; en particulier un excès conduit à une expansion du ciment durci. La valeur optimale de gypse à ajouter est déterminée par l'observation de la chaleur d'hydratation. Généralement un premier pic de chaleur est observé immédiatement après gâchage, suivi par un second 4 à 8 heures plus tard. Un bon dosage en gypse réagit de manière à ne laisser que de faibles quantités de C3A qui ne permettent pas l'apparition tardive d'un dégagement de chaleur important.

La quantité de gypse présent dans le ciment est usuellement exprimée en poids de SO_3 et varie selon la quantité de C3A; moins de 2,5% quand C3A n'excède pas 5% et jusqu'à 3% lorsque C3A dépasse 5%.

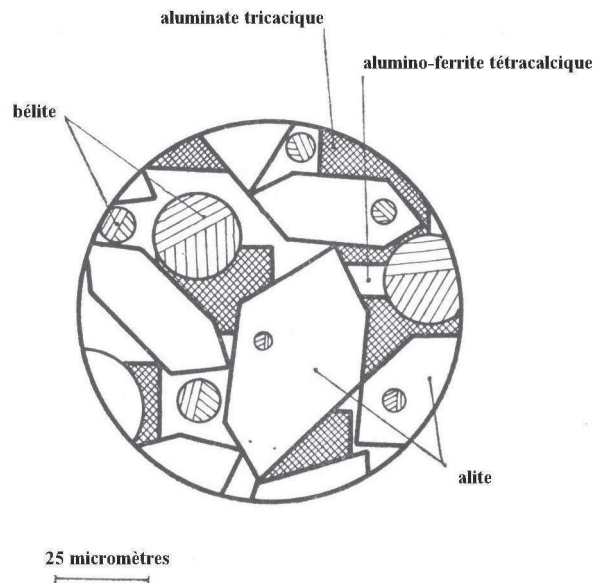


Fig.1.4.2 Exemple schématique de microstructure d'un clinker refroidi lentement [1].

1.5 Prise et fausse prise du ciment Portland.

La pâte de ciment conserve après le gâchage et pendant quelques heures une certaine plasticité. Après 3 à 7 heures, pour un ciment Portland à 20°C, apparaît une augmentation relativement brusque de la cohésion accompagnée d'une augmentation de température; c'est le début de la prise. Quelques heures plus tard, la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un bloc rigide, c'est la fin de prise. La résistance mécanique de ce bloc croît régulièrement avec le temps, c'est le durcissement. Des essais de laboratoire permettent de suivre ces phénomènes [1]. Il semble que la prise de ciment est causée par l'hydratation sélective des différents composants de ce ciment; les deux premiers à réagir étant C3A et C3S. Le flash-set de C3A mentionné précédemment peut être étalé par l'addition de gypse de sorte que l'on puisse considérer que C3S réagit en premier. Des essais sur C3S pur montrent un début de prise alors que C2S se rigidifie d'une manière graduelle.

Une prise convenablement retardée permet la formation d'une charpente de pâte de ciment établie à partir du silicate de calcium hydraté alors que, lorsque C3A a la possibilité de réagir en premier, il se forme de l'aluminate de calcium hydraté poreux. Les autres composants du ciment s'hydratent alors autour de cette charpente et les caractéristiques de résistance de la pâte de ciment s'en trouvent sensiblement affectées.

Le processus de prise est accompagné de variations de températures; le début de prise correspond à une rapide élévation de température et la fin de prise à un pic de température. A ce dernier instant, une légère chute de conductivité électrique est constatée, ce qui a justifié les tentatives de mesure de la prise par des moyens électriques [6].

Différents facteurs influent sur le temps de prise, les plus importants étant:

- les ciments: les ciments riches en C3A ont une prise rapide qui peut être retardée par le gypse selon le processus cité plus haut. La prise est d'autant plus courte que la finesse du ciment est plus élevée. Les temps de prise augmentent avec l'événement du liant;
- l'eau de gâchage: plus la quantité d'eau est faible et plus les temps de prise sont courts;
- les conditions de température: une augmentation de la température diminue les temps de prise de la plupart des liants et inversement une diminution augmente le temps de prise (fig1.5.1). Le temps de prise dans l'eau est un peu plus long que dans l'air;
- les composés solubles: ils peuvent accélérer ou retarder la prise; il existe des adjuvants accélérateurs ou retardateurs de prise et de durcissement.

La fausse prise est un phénomène qui se produit pendant ou après le gâchage et qui se caractérise par un brusque épaissement de la pâte pur, du mortier ou du béton sans dégagement de chaleur appréciable, contrairement au flash-set. Un malaxage plus poussé, sans ajout d'eau redonne au matériau sa plasticité initiale sans perte de résistance finale.

Une des causes de la fausse prise est la déshydratation partielle du gypse dans les broyeurs, si la température dépasse 110°C à 120°C; l'hémihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) et l'anhydride (CaSO_4) se forment et sont très avides d'eau. Ils donnent rapidement lors du gâchage des cristaux de gypse qui rigidifient la pâte.

Une autre de la fausse prise peut être associée à la présence des alcalis dans le ciment. Lors de l'entreposage, ils peuvent subir une carbonatation et les carbonates obtenus réagissent avec Ca(OH)_2 libéré lors de l'hydrolyse de C3S pour former CaCO_3 qui précipite et entraîne la rigidité de la pâte.

Il a été également suggéré que ce phénomène de fausse prise puisse être dû à l'activation de C3S par une humidité ambiante élevée. Les surfaces fraîchement activées peuvent réagir rapidement lors du gâchage [6].

La fausse prise se produit surtout avec les ciments fins et les ciments fortement gypsés (CPA500, CLK325...) et par temps froid. Le phénomène disparaît souvent si on laisse reposer le ciment quelques jours.

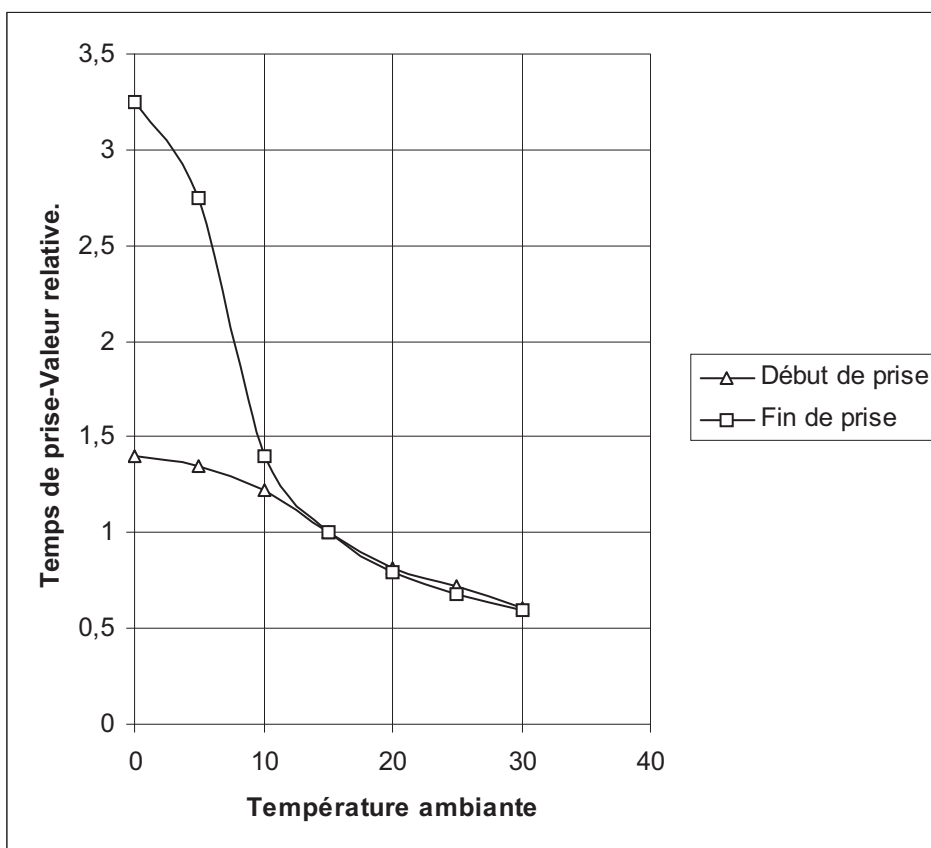


Fig.1.5.1 Temps de prise du ciment Portland ordinaire à différentes températures relativement au temps de prise à 15°C [6].

1.6 Finesse du ciment Portland.

L'hydratation du ciment dépend de la surface totale des particules susceptibles de réagir. Un développement rapide de la résistance du ciment dépend donc de la finesse de mouture du clinker. Ce broyage influe énormément sur le coût de production du ciment et l'expose à une rapide

détérioration lors de son exposition à l'atmosphère due essentiellement à la réaction prématurée des alcalis. La finesse du ciment est donc une propriété importante qui doit être contrôlée prudemment.

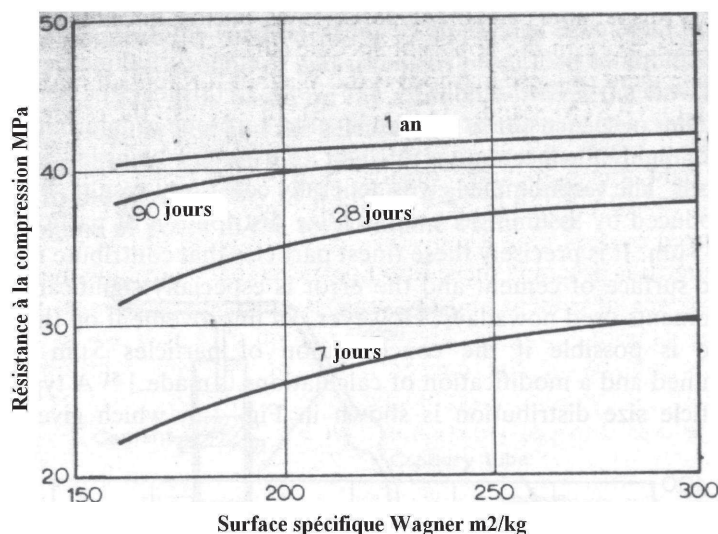


Fig.1.6.1 Relation entre la résistance à la compression du béton et la finesse du ciment.

Par le passé, la détermination de la finesse d'un ciment était basée sur le résidu d'un tamisage à 90 µm (norme ASTM N°170). Une proportion de 10% en poids caractérisait un ciment ordinaire; un pourcentage de 5% de résidu, un ciment à prise rapide.

Cette méthode ne donnait pas d'information sur les particules dont le diamètre est inférieur à 90 µm. Ces particules jouent un rôle essentiel dans l'hydratation de départ et des tamis de plus faible diamètre sont pratiquement inutilisables.

Les normes plus récentes telles BS4550:part3:section3.3:1978 préconisent l'utilisation de la surface spécifique du ciment.

Une approche directe peut être obtenue par sédimentométrie. La loi de Stokes donne la vitesse de chute sous l'action de la gravité d'une particule sphérique dans un fluide. Il convient, bien sûr, d'utiliser un milieu inerte vis-à-vis du ciment et d'utiliser un défloculant pour avoir une bonne dispersion des grains.

Une méthode a été développée sur ce principe et mise en oeuvre dans le turbidimètre de Wagner (norme américaine ASTM C115-79a). Le fluide utilisé est le kérosène, la concentration de particules à différents niveaux est mesurée par la diffusion de la lumière grâce à une cellule photoélectrique.

Une erreur est toutefois introduite par l'assimilation de la distribution des particules inférieures à 7,5 µm à un étalement uniforme. C'est précisément ces particules qui participent de manière prépondérante à la finesse des ciments produits de nos jours. Cette méthode a été améliorée par la mesure indépendante des particules inférieures à 5 µm.

Une méthode plus récente a été développée par Léa et Nurse (BS4550:part3:section3.3:1978) et est basée sur la perméabilité à l'air du ciment. Connaissant la densité du ciment, il est possible de déterminer la masse nécessaire pour avoir une porosité de 0,475. Une mesure de la différence de pression à l'entrée de la cellule contenant le ciment et à sa sortie, et la mesure du débit d'air sec ont permis à Carman de donner la formule suivante:

$$S = \frac{14}{\rho(1-e)} \sqrt{\frac{e^3 A h}{K L h_2}}$$

où:

ρ = densité du ciment ;
 e = porosité de l'échantillon;
 A = section transversale de l'échantillon;
 L = hauteur de l'échantillon;
 h_1 = chute de pression à travers l'échantillon;
 h_2 = chute de pression à travers le capillaire;
 K = constante du débitmètre.

Pour un appareil donné, l'expression se réduit à:

$$S = \frac{K_1}{\rho} \sqrt{\frac{h_1}{h_2}}$$

S étant la surface spécifique.

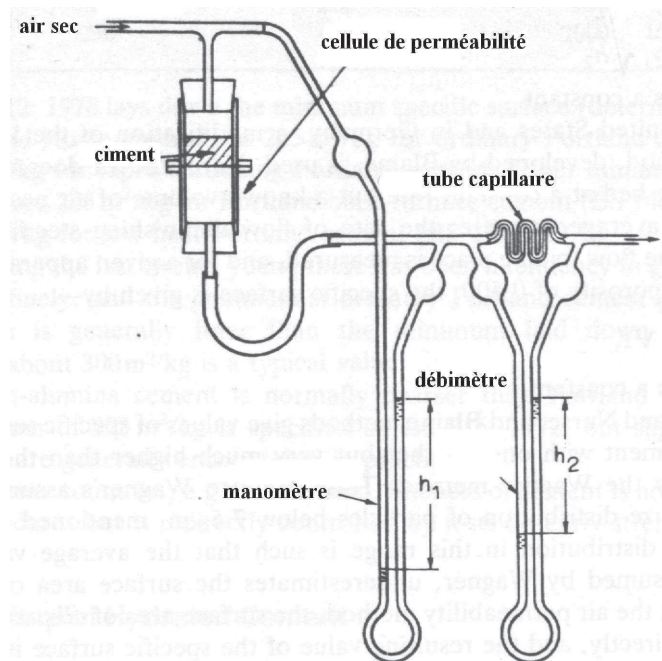


Fig.1.6.2 Perméamètre à air de Lea et Nurse.

La méthode de Lea et Nurse, sous une forme modifiée par Blaine est actuellement la plus utilisée. Elle consiste à déterminer le temps d'établissement d'un débit stationnaire d'air à travers l'échantillon de ciment de porosité 0,500 partant d'une pression moyenne standard. La formule citée précédemment prend alors la forme:

$$S = K_2 \sqrt{t}$$

K_2 étant une constante.

Les méthodes de Lea et Nurse, et Blaine donnent des valeurs rapprochées mais de 1,6 à 2,2 fois supérieures aux valeurs déterminées par la méthode de Wagner. Ceci est dû essentiellement à la valeur moyenne de 3,75 μm prise pour représenter toutes les particules de diamètre inférieur à

7,5 μm . Il est important de signaler qu'en pratique c'est la variation relative de la surface spécifique qui est significative.

Une mesure absolue de la surface spécifique a été développée à partir des travaux de Brunauer, Emmet et Teller [16]. Les méthodes de perméabilité mettent à contribution uniquement les chemins continus à travers l'échantillon de ciment, l'absorption d'azote permet d'accéder à une plus grande surface.

Ciment	Surface spécifique m ² /kg		
	Wagner	Lea et Nurse	Absorption d'hydrogène
A	180	260	790
B	230	415	1000

Tableau 1.6.3 Exemple de valeurs de la surface spécifique donnée par les différentes méthodes.

Une valeur typique de 300 m²/kg est généralement admise pour un ciment Portland ordinaire actuel avec la méthode de Lea et Nurse.

1.7 Résistance mécanique du gel de ciment.

1.7.1 Considérations générales.

La méconnaissance, jusqu'à l'heure actuelle, de l'origine du durcissement du ciment permet de prendre comme référence les travaux de Le Chatelier en 1882 et de W. Michaëlis en 1893.

La théorie de Le Chatelier suppose que les produits d'hydratation ont une solubilité inférieure à celle des composants initiaux et forment donc un précipité à partir d'une solution sursaturée. Ce précipité est formé de cristaux allongés possédant des propriétés adhésives et de cohésion élevées.

La théorie colloïdale proposée par W. Michaëlis postule que la forme cristalline de l'aluminate, le sulfoaluminate et l'hydroxyde de calcium est à l'origine de la résistance initiale. Les silicates sont ensuite attaqués par l'eau saturée de chaux et forment une masse gélatineuse. Cette masse durcit graduellement par perte d'eau vers l'extérieur et par hydratation des grains de ciment non encore attaqués à l'intérieur du noyau.

En fait les deux théories ne sont pas inconciliables. La chimie des colloïdes a montré récemment que les propriétés de ces corps ne sont pas dues uniquement à l'irrégularité des cristaux qui les composent mais principalement à leur grande surface [4].

Le ciment Portland mélangé à une grande quantité d'eau produit en quelques heures une solution sursaturée en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ contenant du silicate de calcium hydraté sous une forme métastable [9]. Cet hydrate précipite rapidement conformément à la théorie de Le Chatelier. Le durcissement qui suit est certainement dû au retrait de l'eau du matériau hydraté tel que l'a postulé Michaëlis.

Des travaux expérimentaux ultérieurs ont montré que les silicates de calcium hydratés se retrouvent en fait sous forme de microcristaux enchevêtrés dont le comportement peut être assimilé à un gel. La résistance de ce gel est due probablement à deux types de liaisons. La première étant une attraction physique entre les surfaces solides assimilables à des forces de Van Der Waals. Le second type est de nature chimique mais seule une faible fraction des particules de gel y participe. L'importance relative de ces deux types de liaison n'est pas encore établie.

1.7.2 Influence des composants minéralogiques sur la résistance du ciment.

Des mesures de la chaleur d'hydratation ont montré qu'elle se présente comme une fonction additive simple de celles des différents composants du ciment. Ceci montre que les différents hydrates conservent leur individualité et le gel de ciment peut être considéré comme un mélange intime ou comme un copolymère d'hydrates. Il est toutefois prudent de ne pas extrapoler ces résultats à d'autres propriétés telle que le retrait, le fluage et la résistance du ciment mais donnent des indications sur les propriétés espérées.

Il a été établi ainsi que C3S contribue au développement de la résistance durant les quatre premières semaines de durcissement et C2S les quatre semaines suivantes, mais ces deux composants participent de manière égale à la résistance finale. A titre indicatif, on a remarqué que la résistance finale à 7 jours de C3S est d'environ 40 MPa alors qu'elle est nulle pour C2S; à 18 mois, elle est de 70 MPa pour ces deux composés.

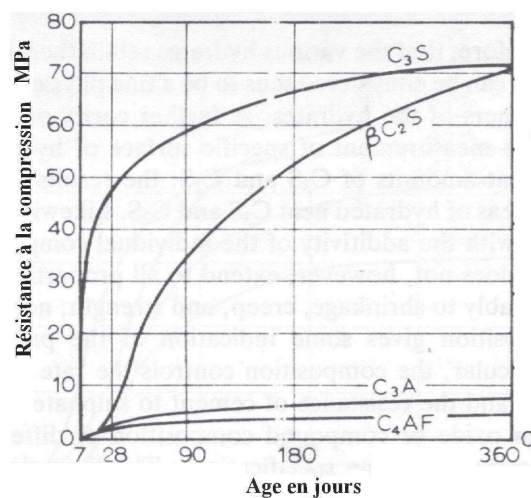


Fig.1.7.2.1 Développement de la résistance des composants purs.

L'influence des autres composants majeurs sur le développement de la résistance du ciment n'est pas établie clairement.

C3A contribue à la résistance de la pâte de ciment durant les trois premiers jours et parfois plus mais cause une régression aux âges avancés, notamment pour les ciments à haute teneur en C3A et en (C3A+C4AF).

C4AF contribue probablement de façon négative sur le développement de la résistance à la manière de CaO.Fe2O3 hydraté sous forme colloïdale qui se dépose sur les grains de ciment et retarde l'hydratation des autres corps.

A partir de la connaissance de la contribution de chacun des composants, il est possible de prévoir la résistance du ciment et une formule simple peut être utilisée [6]:

$$\text{Résistance} = a.C3S + b.C2S + c.C3A + d.C4AF.$$

a,b,c et d étant des paramètres représentant la contribution des proportions des composants.

Cette relation doit toutefois être utilisée avec prudence car la résistance finale dépend d'autres éléments tels que les conditions de cure et d'autres variables non encore connues.

Les investigations quant au rôle des composants mineurs sont limitées car leur importance n'est que relative quand il s'agit de résistance du ciment. Il est admis que K_2O remplace une molécule de CaO dans C_2S et augmente ainsi la proportion de C_3S .

Des mesures sur l'influence des alcalis ont montré une action notable sur la résistance avant l'âge de 28 jours, mais une augmentation de la quantité d'alcalis diminue le gain en résistance. Ce gain en résistance entre 3 et 28 jours, assez faible d'ailleurs, peut être attribué au K_2O soluble présent dans le ciment [17][1].

Des essais accélérés ont mis en évidence, jusqu'à 0,4%, un accroissement de la résistance en fonction de la quantité de Na_2O [18].

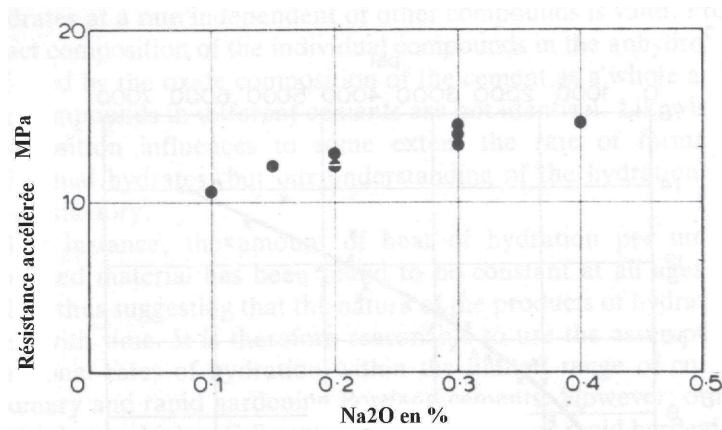


Fig.1.7.2.2 Effet d'un alcali sur la résistance accélérée du ciment.

1.8 Eau retenue dans la pâte de ciment.

Le caractère hydrophile du ciment et la présence de pores microscopiques (15 à 20 Å° selon Michaëlis) expliquent la présence de l'eau dans le ciment hydraté. La quantité de cette eau dépend de l'humidité ambiante. Cette eau est retenue dans le ciment hydraté sous différentes formes et d'une manière plus ou moins ferme allant de l'eau libre à l'eau liée chimiquement qui fait partie des composés hydratés.

Les particules du gel retiennent à leur surface une certaine quantité appelée eau absorbée alors que celle fixée entre certains plans des cristaux est appelée eau zéolitique ou inter-couches.

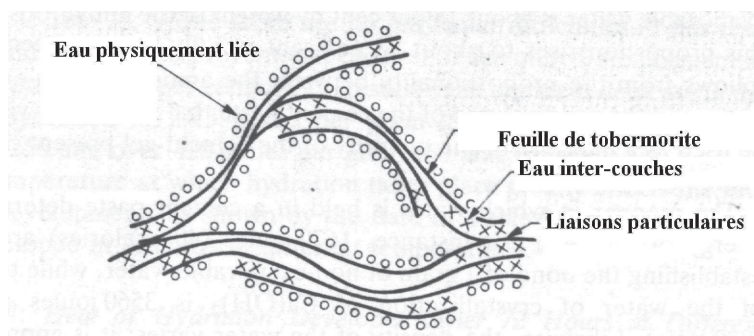


Fig.1.8.1 Structure probable des silicates hydratés [9].

Il est difficile de déterminer la part de ces différents états de l'eau retenue même en se basant sur des considérations théoriques fondées sur l'énergie de liaison car cette dernière est du même ordre de grandeur pour les liaisons dans les hydrates et les liaisons de surface.

Une autre représentation arbitraire de l'eau d'hydratation est de considérer une partie évaporable et une autre non évaporable. Cette séparation peut être obtenue par séchage jusqu'à un poids constant, sous une pression constante de valeur usuelle 1 Pa à 23°C retenue à partir d'essais sur $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Plus récemment une technique de séparation sous vide à -79°C et à 0,07 Pa a été proposée. Il est également possible d'utiliser un étuvage à 105°C, une réfrigération ou un solvant spécifique afin d'obtenir une séparation des formes supposées de l'eau dans la pâte. L'eau non évaporable est essentiellement celle liée chimiquement, elle augmente avec le processus d'hydratation. Pour une pâte saturée, l'eau non évaporable ne dépasse jamais la moitié de l'eau totale. Pour un ciment convenablement hydraté, cette forme est d'environ 18% en poids du matériau anhydre et atteint 23% pour un ciment totalement hydraté.

1.9 Contrôle du ciment Portland.

La fabrication du ciment nécessite un contrôle strict de la part du producteur afin de garantir une qualité conforme aux normes en vigueur et une constance dans la production. Pour une utilisation spéciale, il devient indispensable de reprendre certains essais par un laboratoire indépendant du fabricant afin de s'assurer de la qualité du matériau.

Les essais du ciment sont généralement classés en trois catégories: les essais sur poudre anhydre, les essais sur pâte pure et les essais sur mortier sur mortier normalisé.

1.9.1 Essais sur poudre anhydre.

Le prélèvement d'échantillon doit se faire avec soins afin d'être aussi représentatif que possible du lot étudié. Différentes fabriques opèrent des prélèvements automatiques et périodiques, espacés d'une heure environ en différents points de la production. L'échantillon obtenu est lui-même divisé par quartage ou à l'aide d'échantillonneur.

1.9.1.1 Masse volumique.

Il existe plusieurs types de matériels pour la mesure de la masse volumique du ciment, on peut citer entre-autres le densimètre de Le Chatelier, le pycnomètre à liquide etc...

1.9.1.2 Granulométrie.

Les particules de ciment ont, en général, des dimensions très petites dont la moitié environ est inférieure à 32 μm . Le tamisage devient pratiquement inutilisable et l'on est alors amené à utiliser des techniques plus élaborées dont la sédimentation, l'élutriation, la pipette d'Andreasen, le compteur Coulter, la granulométrie laser etc...

1.9.1.3 Surface spécifique.

La mesure de la surface spécifique dépend largement de la méthode utilisée (voir 1.5) mais donne une valeur relative, pour différents ciments, de la finesse du matériau.

1.9.1.4 Perte au feu.

Elle permet de mesurer l'étendue de la carbonatation et de l'hydratation de la chaux libre et de la magnésie libre dues à l'exposition à l'air libre (maximum 3% selon BS 12 :1978). Plus la perte au feu est importante, meilleure est la qualité du ciment.

1.9.1.5 Résidus insolubles.

Par traitement à l'acide chlorhydrique, les résidus insolubles mesurent l'altération du ciment pur par les impuretés du gypse.

1.9.1.6 Composition chimique.

Elle s'effectue généralement à chaque phase de la fabrication et différentes méthodes sont utilisées parmi lesquelles l'analyse gravimétrique et l'analyse par fluorescence aux rayons X.

1.9.2 Essais sur pâte pure.

1.9.2.1 Essai de consistance.

Cet essai a pour but de déterminer la quantité d'eau à ajouter au ciment pour que la prise se fasse dans de bonnes conditions.

La consistance d'une pâte de ciment est déterminée par l'appareil de Vicat en évaluant l'enfoncement d'une sonde métallique de diamètre 10 mm exerçant un poids de 300 ± 1 gf.

Une pâte confectionnée selon une procédure normalisée est dite normale lorsque la sonde s'arrête à 6 ± 1 mm du fond de l'anneau de hauteur 40 mm.

1.9.2.2 Essai de prise.

En utilisant l'aiguille de Vicat de section 1 mm², le début de prise est établi lorsque cette aiguille ne pénètre pas jusqu'au fond de l'anneau et la fin de prise lorsqu'elle ne laisse plus de trace sur la pâte.

Certaines expériences [20] ont mis en évidence la variation de la vitesse de transmission d'ultrasons à travers la pâte lors de la prise mais n'ont pas donné lieu à aucune méthode de mesure de temps de prise. Des tentatives d'utilisation de mesures électriques n'ont également pas abouti à cause de l'influence des adjuvants sur les propriétés du ciment [21].

1.9.2.3 Variation de volume.

Le retrait peut être considéré comme un phénomène normal alors que le gonflement est à redouter; il peut être dû à la réaction de certains agents présent dans le ciment durci tels que la chaux libre, la magnésie ou le sulfate de calcium [6].

La chaux libre ne peut être déterminée par analyse chimique car il n'est pas possible de faire la distinction entre CaO qui n'a pas réagi et Ca(OH)₂ produit par une hydratation partielle des silicates lors de l'exposition du ciment à l'air libre, mais des mesures sur le clinker, immédiatement après sa sortie du four, peut donner des indications sur la chaux libre.

La présence de MgO qui réagit avec l'eau de manière similaire à CaO peut être une cause de gonflement.

Le sulfate de calcium est le troisième agent susceptible de causer une expansion, il forme alors le sulfoaluminate de calcium. Cette situation ne peut avoir lieu que si la quantité de gypse, ou sulfate de calcium hydraté, n'est présente en valeur supérieure à celle qui peut réagir avec C3A.

Le gonflement n'apparaissant, généralement, qu'après des mois, sinon des années. Il convient de procéder à des essais accélérés.

La détection des agents expansifs se fait à l'aide des aiguilles de Le Chatelier. Les essais à froid utilisent une pâte conservée pendant 7 jours à 20°C; pour les essais à chaud, la pâte est maintenue trois heures à 100°C, l'écartement des aiguilles ne doit pas dépasser 10 mm.

1.9.3 Essais sur mortier.

La résistance mécanique du ciment durci est la caractéristique essentielle de ce matériau lors de son utilisation dans les structures. Les difficultés de moulage et la dispersion des résultats d'une pâte pure imposent l'utilisation d'un mortier à partir d'un sable normalisé et parfois l'utilisation d'un béton normalisé.

Les trois essais de contrôle utilisés sont la résistance à la compression, la résistance à la traction et la résistance à la flexion. Le mortier ou le béton ont une résistance à la compression importante par rapport à la traction et la résistance à la flexion sert en fait à déterminer le comportement à la traction. Ce qui explique le fait que certaines normes se contentent de deux essais parmi les trois [6]. Les modes opératoires de ces différents essais sont légèrement différents selon le pays: ASTM C403 aux U.S.A.; BS4550 en Grande Bretagne; AFNOR en France; SIA215 en Suisse; GOCT en ex-URSS etc...

Certains auteurs préconisent l'utilisation des mêmes essais sur un béton normalisé afin de mieux approcher l'utilisation réelle du ciment dans les structures porteuses, mais l'influence du ciment sur les propriétés du mortier et du béton est qualitativement la même, en particulier la relation entre la résistance de ces deux matériaux est linéaire.

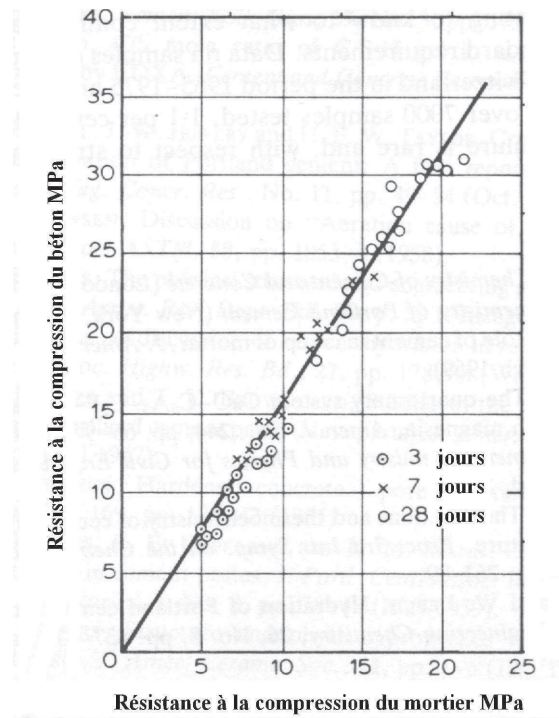


Fig.1.9.3.1 Relation entre les résistances du béton et du mortier pour un même rapport eau/ciment [22].

On peut également s'intéresser aux variations dimensionnelles telles que le retrait, le gonflement ou le fluage en utilisant des éprouvettes normalisées [23][24].

Chapitre 2

ANALYSE DES DONNEES

2.1 Introduction à l'analyse des données.

L'analyse des données est une technique relativement récente qui a posé ses bases dans les années 1960-1970 [25,26,31]. Elle est née du besoin de traitement et d'exploitation rapides des grandes masses d'information qu'il est possible aujourd'hui de recueillir et dont l'apparence est souvent incohérente. Les statisticiens modernes, se refusant à faire des hypothèses contestables, tendent à présenter les faits bruts mais les examinent sous un angle tel que les tendances apparaissent d'elles-mêmes évitant ainsi l'abus de leurs aimés des lois de probabilités censées représenter notre univers aléatoire.

Cette démarche n'est pas nouvelle et a conduit à l'élaboration de la régression simple, traitée le plus souvent par la méthode des moindres carrés qui ne peut cependant raisonner que sur un nombre limité de variables. L'analyse de données se propose d'utiliser un nombre quelconque de variables et porte de ce fait le nom d'analyse multivariée ou analyse multicritères, ceci n'a été possible qu'en faisant appel aux espaces mathématiques comportant un nombre quelconque de dimensions qui peuvent être actuellement manipulés grâce à l'avènement de l'informatique et de sa généralisation [25].

2.1.1 Notions de statistiques.

La théorie des probabilités est une science mathématique étudiant les lois régissant les phénomènes aléatoires. Un phénomène est dit aléatoire si, reproduit à plusieurs reprises, se déroule chaque fois un peu différemment d'une manière imprévisible. Les variations aléatoires d'une série d'expériences dont les conditions essentielles sont maintenues constantes sont liées à la présence de facteurs secondaires.

Tout phénomène déterministe est inévitablement accompagné d'écarts aléatoires. Néanmoins, dans certaines applications pratiques, on peut négliger ces éléments aléatoires en remplaçant le phénomène réel par un schéma simplifié, son modèle, en supposant que dans les conditions données de l'expérience, il se déroule d'une manière déterminée. Parmi la multitude des facteurs intervenant dans le phénomène examiné, on sélectionne les plus importants, ceux qui sont fondamentaux et on néglige l'influence des autres facteurs. C'est la méthode usuelle d'étude des phénomènes utilisée en physique par exemple.

Cependant, pour résoudre un certain nombre de problèmes, la méthode des sciences exactes ne peut être utilisée. Pour certains problèmes, le résultat de l'expérience dépend d'un nombre de facteurs si important qu'il est impossible de les enregistrer ou même de soupçonner leur existence. Leur nombre est si important et leur influence si complexe que l'utilisation des méthodes classiques n'est plus justifiée [26].

Il existe plusieurs définitions descriptives de la statistique ou statistique mathématique. L'une des plus simples et des plus vagues repose sur une comparaison liée à la notion de d'échantillon d'une population générale et au problème de distribution traité par la théorie des probabilités. Ce problème direct de la théorie des probabilités consiste à étudier la distribution de la composition d'un échantillon aléatoire au vu de la composition d'une population générale. Le problème inverse qui tente de reconstruire la population entière à partir d'un échantillon fait l'objet de la statistique [27].

Une seconde définition peut être formulée en considérant la statistique comme la science qui a pour objet de recueillir un ensemble de données numériques relatives à un phénomène aléatoire et d'exploiter cette information pour établir toutes les relations de causalité par l'analyse et l'interprétation.

L'ensemble étudié ou référentiel statistique, composé d'éléments ou unités statistiques, est appelé population ou univers et un sous-ensemble est un échantillon. Il convient de préciser qu'une

unité statistique doit être définie sans ambiguïté et peut comporter de nombreux caractères eux-mêmes pouvant comporter plusieurs modalités. Les caractères auxquels on peut attribuer une valeur numérique sont des caractères quantitatifs par opposition aux caractères auxquels on ne peut qu'associer une valeur numérique arbitraire appelés caractères qualitatifs [28].

Dans l'univers aléatoire où nous vivons, il est rare qu'un phénomène soit une fonction rigoureuse d'un ou plusieurs autres et des corrélations plus ou moins bonnes nous permettent d'expliquer certaines variables y_i en fonction d'autres variables explicatives x_i . Leur représentation sous forme de couple (x_i, y_i) constitue une distribution, il convient d'utiliser des valeurs caractéristiques ou typiques les plus représentatives de l'ensemble. Parmi ces valeurs on distingue les paramètres de position tels que la moyenne arithmétique définie par:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i$$

n étant l'effectif de l'échantillon; les paramètres de dispersion les plus utilisés étant la variance exprimée par:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum n_i (x_i - \bar{x})^2$$

n_i étant la fréquence de chaque valeur de x_i ;

l'écart type qui n'est autre que la racine-carrée de la variance et enfin les paramètres de forme.

Selon Yule, les conditions à remplir par une valeur-type, pour représenter un ensemble, sont les suivantes:

Condition 1: la valeur-type doit être définie de manière objective et ne doit laisser aucune place à l'interprétation ou à l'appréciation du statisticien quant à sa définition;

Condition 2: la valeur-type doit dépendre autant que possible de toutes les observations de la série;

Condition 3: la valeur-type doit avoir une signification concrète et aisée à comprendre;

Condition 4: la valeur-type doit se prêter à des calculs simples;

Condition 5: la valeur-type doit être peu sensible aux fluctuations d'échantillonnage;

Condition 6: la valeur-type doit se prêter aisément aux calculs algébriques ultérieurs.

L'écart type qui remplit toutes les conditions de Yule est le plus sensible, le plus significatif et le plus précis des paramètres de dispersion [28].

2.1.2 L'inertie en analyse de données.

Le rapprochement entre les calculs de probabilités et les calculs de mécanique permet de conclure rapidement à une similitude au sens mathématique entre moyenne et centre de gravité et entre variance et inertie, la fréquence est équivalente à la masse et l'écart à la distance. De ce fait, toutes les méthodes et tous les résultats relatifs à l'inertie s'appliquent sans précautions particulières aux calculs en statistique.

Un nuage de points pesants se comporte comme un corps solide et possède un ellipsoïde d'inertie dont les axes indiquent une orientation générale du nuage; le grand axe correspond à la tendance dominante. Il est à noter toutefois qu'un point pesant peut avoir un nombre quelconque k de coordonnées avec comme seule restriction de ne pas dépasser le nombre n de points.

Nous conviendrons dans tout ce qui suit que:

- si tous les points ont la même masse, nous appellerons X la matrice des coordonnées de dimensions (n, k) ;

- si les points ont chacun une masse différente, X est une matrice obtenue en multipliant les k coordonnées de chaque point par, m étant la masse du point.

-nous désignerons par V la matrice carrée, symétrique, résultat du produit $X'X$ de dimensions (k,k) dans le cas d'une matrice haute et XX' si elle est plate, X' étant la transposée de X .

Avec ces conditions, la matrice V est la matrice d'inertie du nuage de points et n'est autre que la matrice variance-covariance.

Les k valeurs propres λ_i de cette matrice sont les inerties expliquées par les axes d'inertie du nuage de points qui sont eux-mêmes les directions des vecteurs propres.

2.1.3 Calcul dual.

Si, au lieu de former la matrice $V = X'X$ de dimensions (k,k) , on forme la matrice $W = XX'$ de dimensions (n,n) pour ensuite la diagonaliser, on obtient dans ce cas n valeurs propres avec la particularité qu'elles sont toutes nulles à l'exception de k premières qui sont identiques à celles de la matrice V . Ceci s'explique par le fait que ces valeurs propres représentent le même ellipsoïde d'inertie. Cette particularité permet de superposer l'espace à k dimensions et l'espace dual dont on ne conserve que les k premières dimensions.

Un nuage de points dans un espace multidimensionnel est difficile à représenter et l'on a recours alors à des projections sur des plans définis par les axes d'inertie ou axes factoriels.

2.2 Méthodes d'analyse des données.

Les méthodes d'analyse des données sont nombreuses et font l'objet de la statistique descriptive, allant du simple dépouillement des résultats sous forme de tableaux se prêtant à l'analyse et à l'interprétation jusqu'aux méthodes les plus élaborées telles que l'analyse canonique. Cependant, les plus courantes qui se sont imposées sont relativement simples.

2.2.1 La corrélation ou régression multiple.

En régression simple, une droite ou toute autre fonction linéarisée est tracée à travers le nuage de n points x dont l'ordonnée y correspond aux n observations dont on dispose de manière à ce que l'écart quadratique moyen des distances des points du nuage à la droite soit minimal.

En corrélation multiple, on généralise le procédé: s'il y a k variables explicatives $x_1, x_2, \dots, x_k$, il s'agit de trouver k coefficients $A_1, A_2, \dots, A_k$ et un terme constant y_0 de façon à obtenir une relation:

$$y = y_0 + A_1.x_1 + A_2.x_2 + \dots + A_k.x_k$$

qui représente le mieux possible la réalité des n observations. Cette relation, appelée équation de régression peut s'écrire sous la forme matricielle suivante, en tenant compte des n observations:

$$Y = y_0 + X.A$$

Les n valeurs de y forment le vecteur colonne Y , les k valeurs de x mesurées n fois forment une matrice X de dimensions (n,k) , A est un vecteur colonne composé des k valeurs A_i et y_0 est le terme constant.

Le vecteur A des coefficients est calculé à partir de la formule:

$$A = (X'.X)^{-1}.X'.Y \quad [27].$$

Ce calcul peut être mené de deux manières différentes:

- la première méthode consiste à centrer les variables, en d'autres termes, transposer l'origine des coordonnées au centre de gravité du nuage. Dans ces conditions la matrice X

de dimensions (n,k) fournit un produit $X'.X$ de dimensions (k,k) identique à la matrice d'inertie V , carrée et symétrique.

Le terme constant est calculé alors par:

$$y_0 = \bar{y} - (A_1 \cdot \bar{x}_1 + A_2 \cdot \bar{x}_2 + \dots + A_k \cdot \bar{x}_k)$$

$\bar{y}$, $\bar{x}_i$ sont les moyennes des observations déjà calculées pour centrer les variables;

- La deuxième méthode utilise un artifice qui évite de centrer les variables. Il s'agit d'adjoindre une colonne de 1 à gauche de la matrice X qui devient une matrice de dimensions (n,k+1). Le produit $X'.X$ donne alors une matrice carrée symétrique de dimensions (k+1,k+1). Le produit $X'.Y$ et le résultat A sont alors de dimensions (k+1,1) et le premier coefficient du vecteur A est le terme constant y_0 .

La seconde méthode, en apparence plus simple, manipule des matrices de plus grandes dimensions que la première.

L'équation de régression existe toujours mais peut être dénuée de sens réel et il importe de critiquer ses résultats. Plusieurs méthodes sont utilisées, nous ne citerons que deux.

La première méthode utilise la matrice de corrélation dont les termes représentent les différentes co-variances entre les variables qui, lorsqu'elle est normée, est composée de coefficients de corrélation [26]:

$$r_{ij} = \frac{K_{ij}}{\sigma_i \cdot \sigma_j}$$

σ étant les écart-types;

K_{ij} les termes de la matrice de co-variances, notés souvent σ_{ij} .

Les termes diagonaux deviennent égaux à 1.

Dans le cas de variables non corrélées, tous les éléments de la matrice de corrélation sont nuls à l'exception de la diagonale [26].

La seconde méthode, dite méthode des résidus, utilise la différence entre la réalité et la représentation. Il existe donc n résidus qui sont obtenus par différence entre les valeurs y réellement observées et celles fournies par l'équation de régression. Nous désignerons par SCR la somme des n carrés des résidus et S^2 la quantité:

$$S^2 = \frac{SCR}{n-k-1}$$

S^2 est en fait une variance qui donne, avec SCR , une indication sur la valeur globale de la régression.

SCR est la somme des carrés à l'arrivée, c'est-à-dire après la détermination de la régression, et la quantité $\sum (y-\bar{y})^2$ est la somme des carrés au départ, $\bar{y}$ étant la moyenne des y .

Le coefficient de corrélation multiple, qui peut être considéré comme médiocre s'il est inférieur à 0,8, est défini par:

$$R = \sqrt{1 - \frac{SCR}{\sum (y-\bar{y})^2}}$$

L'écart-type par rapport à la valeur trouvée de chacun des coefficients A_i s'obtient en multipliant S par la racine-carrée de chacun des éléments de la diagonale de la matrice inversée V^{-1} [25].

2.2.2 Régression pas à pas.

Dans certains cas les variables que l'on suppose avoir une influence sur la variable à expliquer sont nombreuses et peuvent être corrélées entre elles. Afin d'éviter une redondance, il est alors indiqué de choisir les variables une par une en commençant par les plus significatives et de s'arrêter à un seuil de signification donné. Les étapes sont alors les suivantes:

- on pratique une régression simple avec chacune des variables candidates et on retient celle qui donne le coefficient de corrélation R le plus élevé ou le SCR le plus petit;
- on réalise une régression double avec la première variable retenue et toutes les variables restantes. On choisit alors celle qui donne le SCR minimum et ainsi de suite.

Chacune des étapes diminue le SCR. La variation $\Delta(\text{SCR})$ permet de former la quantité:

$$F = \frac{\Delta(\text{SCR})}{S^2}$$

dont la racine-carrée sera comparée au t d'une table de Fisher pour $(n-k-1)$ et un degré de liberté et l'on s'arrête lorsque le résultat sera négatif.

Une amélioration de la méthode consiste, à chaque étape, à réexaminer les variables antérieures car l'addition de la dernière variable peut rendre inutile la présence d'une des précédentes en raison de corrélations mutuelles.

Afin d'éviter toute régression rétroactive, une méthode abrégée dite d'Efroymson procède par régressions simples successives à l'aide d'un grand tableau $(2k+1)(2k+1)$ [30].

2.2.3 Analyse factorielle de correspondance.

L'analyse factorielle de correspondance est essentiellement un mode de présentation graphique de tris croisés multiples entre plusieurs caractères présentant plusieurs modalités (voir §2.1.1). Elle vise à rassembler en un ou plusieurs graphes la plus grande partie possible de l'information contenue dans un tableau en s'attachant, non pas aux valeurs absolues mais aux correspondances entre les caractères exprimés en valeurs relatives.

2.2.3.1 Tableaux de contingence et tableaux de Burt.

On désigne par le nom de tableau de contingence un tableau ventilant une population selon deux caractères dits croisés l'un avec l'autre; cette opération est appelée tri croisé.

Si les caractères sont progressifs et possèdent des modalités plus ou moins mesurables selon une certaine échelle, on parle alors de caractères scalés ou simplement classables selon un certain ordre; ce sont alors des caractères ordinaux. Si aucun ordre n'est établi, le caractère devient alors qualitatif ou nominal.

Une caractéristique essentielle des tableaux de contingence est que les marges, marge à droite et marge en bas, ont une signification car elles totalisent les individus possédant une des modalités de l'un des caractères. La somme des chiffres de chacune des marges est alors égale à la population totale que nous désignerons par pp .

Tout tableau de contingence peut être réduit en divisant tous ses éléments par pp, la somme des marges devient égale à 1. Pour des commodités d'écriture, on donne le nom de main M aux nombres de la marge de droite et le nom de pied P aux nombres de la marge du bas.

L'étude complète d'une population donnée, ventilée sur un grand nombre de caractères doit porter à la fois sur les meilleurs couples de caractères à considérer et, à l'intérieur d'un couple sur les cases qui apportent le plus d'information. Une telle étude est facilitée par le tableau de Burt. Il s'agit d'un grand tableau, unique, qui croise chacun des caractères avec tous les autres. Les tableaux élémentaires carrés, diagonaux, qui apparaissent sur la diagonale principale croisent le caractère avec lui-même; leur diagonale est appelée tri à plat du caractère considéré. Cette diagonale joue le rôle de marge pour les tableaux situés sur la même ligne ou sur la même colonne.

Les autres tableaux sont tous des tableaux de contingence. Ils sont généralement rectangulaires et se retrouvent deux fois, symétriquement par rapport à la diagonale principale. Leurs marges figurent dans la diagonale principale soit à la même ligne, soit à la même colonne, appelées alors marges en bas et qui peuvent se trouver en haut.

Deux tableaux symétriques, transposés l'un de l'autre, sont présentés de manière duale.

2.2.3.2 Notion de lien.

Le χ^2 de Pearson joue un rôle important en analyse des données. Pearson a démontré que la conformité d'un phénomène aléatoire à une loi de probabilité posée a priori à titre d'hypothèse peut se vérifier à l'aide du test du χ^2 .

La fréquence observée f_0 est comparée à la fréquence théorique f_{th} donnée par la loi et ceci pour chacune des observations à la condition que toutes ces fréquences soient supérieures à cinq. La quantité:

$$\chi^2 = \sum \frac{(f_{th} - f_0)^2}{f_{th}}$$

permet de tirer de la table de Pearson la probabilité pour que la loi soit vraisemblable. Le χ^2 a la dimension d'une population. Une grande valeur du χ^2 montre une tendance car la loi de comparaison est souvent le hasard pur appelé hypothèse nulle.

Il est commode d'avoir un critère indépendant de la population qui mesure le lien entre deux caractères et qui serait nul dans le cas où les caractères sont indépendants, on aboutit par des voies différentes de celles de Pearson à la définition suivante:

$$\text{Lien de deux caractères} = \chi^2 / \text{population.}$$

Les éléments d'un tableau réduit à l'unité contiennent des fréquences relatives f_{ij} notées simplement f. Le lien de deux caractères pour tout le tableau sera alors:

$$\text{Lien} = \sum \frac{(f - M.P)^2}{M.P}$$

Sachant que l'on a:

$\sum M = 1$; $\sum P = 1$; $\sum M.P = 1$ et $\sum f = 1$, le développement de $(f - M.P)^2$ donne:

$$\text{Lien} = \sum \frac{f^2}{M.P} - 1$$

2.2.3.3 L'analyse factorielle des correspondances -AFC.

L'analyse factorielle des correspondances, AFC, élaborée en 1964 [31] par J.P.Benzecri et son équipe permet de résoudre le problème d'échelle de représentation des nuages de points dont il a été question au §2.1.3. J.P.Benzecri introduit une pondération énoncée selon, la définition suivante.

L'analyse factorielle des correspondances consiste, dans l'une des analyses, à pondérer les points par la racine-carrée des masses, et dans l'autre analyse, duale de la première, à pondérer les masses par la racine-carrée des points.

Autrement dit, dans la première analyse, on garde pour chaque point la masse $m = P$, mais la coordonnée x qui était égale à f / P devient $f / P \sqrt{M}$; inversement, dans la seconde analyse, nous avons $m = M$ et $x = f / M \sqrt{P}$.

Le moment d'inertie d'un point pesant est égal à la coordonnée du point $f / P \sqrt{M}$ élevée au carré, multipliée par la masse P de ce point, soit:

$$(f^2 / P^2 . M) P = f^2 / P . M$$

expression parfaitement symétrique en P et M . Pour tous les points, on obtient la même quantité $\sum f^2 / P . M$ dans les deux analyses, quantité qui apparaît dans la définition du lien dont le premier terme est le moment d'inertie du nuage par rapport à l'origine O des coordonnées et le terme 1 correspond au transfert de ce moment au centre de gravité du nuage par application du théorème d'Huygens.

Les moments d'inertie des deux nuages de points sont donc égaux entre eux et leur valeur commune est le lien. Le terme courant du lien $(f - MP)^2 / MP$ est appelé brin. Cette identité des moments d'inertie élémentaires avec les composantes du lien s'exprime en disant que l'AFC suit une métrique du χ^2 car $\chi^2 = \text{lien} \cdot \text{population}$.

Les axes d'inertie sont alors déterminés selon les explications données en 2.1.2. Il est à remarquer que les deux calculs sont duaux l'un de l'autre, il est plus judicieux de former la matrice V de dimensions (k,k) plutôt que la matrice W de dimensions (n,n) si l'on suppose que n est supérieur à k , ce qui revient à prendre $V = X' . X$ si la matrice des données est haute et $V = X . X'$ si elle est plate.

La diagonalisation de la matrice V fournit les valeurs propres dont la somme est la trace représente le lien. Cette diagonalisation fournit également les composantes des vecteurs propres ou axes factoriels. La projection sur ces nouveaux axes des points représentatifs s'obtient par le produit scalaire des vecteurs représentant chaque point et chaque axe. La seconde analyse est inutile car les points duaux s'obtiennent par un calcul dual. Le nombre d'axes factoriels est égal à $k-1$, k étant la plus petite dimension du tableau. Chacun des axes i explique $li / \sum li$ de la variance.

2.2.4 Propriétés et interprétation de l'analyse factorielle de correspondance.

2.2.4.1 Equivalence distributionnelle.

L'équivalence distributionnelle est une propriété fondamentale de l'AFC et peut s'énoncer ainsi:

Pourvu qu'une classe n'ait pas un poids trop élevé par rapport à l'ensemble, sa décomposition en deux sous-classes est représentée par des points dont le centre de gravité approximatif est le point représentant la classe entière. Nous nous contenterons de cet énoncé, une explication complète est donnée par J.P.Benzecri [32].

2.2.4.2 Lien et χ^2 - Critère β - Degré de liberté.

Dans le cas d'un tableau à n lignes et k colonnes, k étant inférieur à n, la valeur maximum du lien est k-1, c'est également le nombre de valeurs propres non nulles et le nombre d'axes factoriels significatifs.

Dans un tableau à n lignes et k colonnes, il est possible de remplir arbitrairement (n-1)(k-1) cases connaissant les marges, à condition que toutes les cases aient un effectif supérieur ou égal à cinq, dans le cas contraire, il faut opérer un regroupement. Le nombre (n-1)(k-1) est appelé degré de liberté.

Le χ^2 qui est égal au lien x population donne une indication sur la validité de la tendance observée. En l'absence de tables de Pearson, le χ^2 peut toujours être utilisé en formant la quantité:

$$\beta = \frac{\chi^2 - (n-1)(k-1)}{\sqrt{(n-1)(k-1)}}$$

Si cette valeur est supérieure à trois, on peut rejeter l'hypothèse d'indépendance de deux caractères avec un risque d'erreur inférieur à 5%.

2.2.4.3 Variables scalées - Cheminements.

Si l'une des variables comporte un ordre naturel, il est clair qu'en joignant, dans l'ordre, les points représentatifs de cette variable, on obtient un cheminement à travers l'autre variable qui peut visualiser l'évolution d'un phénomène. Si la variation d'un phénomène est liée au temps, le cheminement représente alors l'évolution au cours de l'existence d'un individu.

2.2.4.4 Interprétation des nuages de points.

L'interprétation des nuages de points obtenus par l'analyse factorielle de correspondance nécessite une certaine expérience de la part de l'utilisateur. Il est toutefois utile de connaître quelques propriétés qui peuvent aider l'interprétation.

La proximité de deux points d'une même catégorie de caractères ou d'un point d'une catégorie avec un point d'une autre catégorie a une signification précise en analyse factorielle de correspondance. Si deux points sont de la même catégorie, ils sont alors de spectre voisin et l'on a probablement intérêt à les réunir en une seule classe selon le principe d'équivalence distributionnelle. S'ils sont de catégorie différente, c'est l'indice d'une prédominance réciproque d'une catégorie dans l'autre d'autant plus nette que les points sont éloignés du centre de gravité. Il faut néanmoins se méfier des fausses proximités dues à l'effet de perspective, car ces points sont des projections sur le plan factoriel. L'examen des pourcentages d'inertie et des plans factoriels permettent de lever le doute. En tout état de cause, il est important de raisonner en terme d'inertie, c'est-à-dire en masse x distance au carré et non en terme de distance uniquement.

L'identification des axes est un point fondamental qui représente une tendance dominante qui n'est pas un caractère unique mais un mélange pondéré de plusieurs caractères concourant à l'effet global.

La forme du nuage apporte des renseignements utiles. Un nuage en forme de croissant enroulé autour du centre de gravité est appelé effet de Guttman [32 tome 2 p292]. L'axe principal oppose les extrêmes alors que le deuxième axe oppose les individus moyens aux deux extrêmes. Si le nuage se décompose en plusieurs parties distinctes, il est probable qu'une modification des lignes et des colonnes du tableau de contingence peut fournir plusieurs tableaux plus ou moins indépendants.

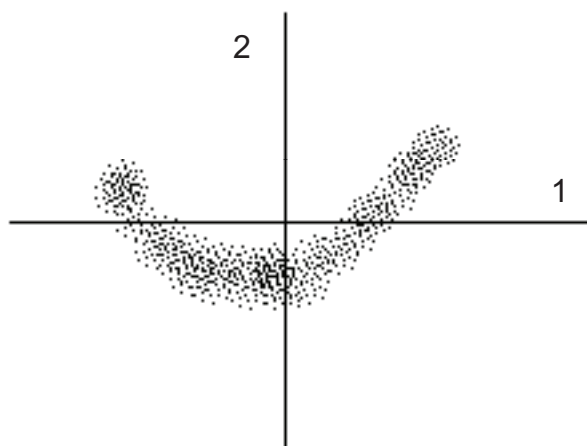


Fig. 2.2.4.4.1 Effet Guttman.

Fig. 2.2.4.4.2 Aspect d'un nuage de points sur le plan factoriel selon la distribution dans le tableau de contingence.



Fig. 2.2.4.4.2 a

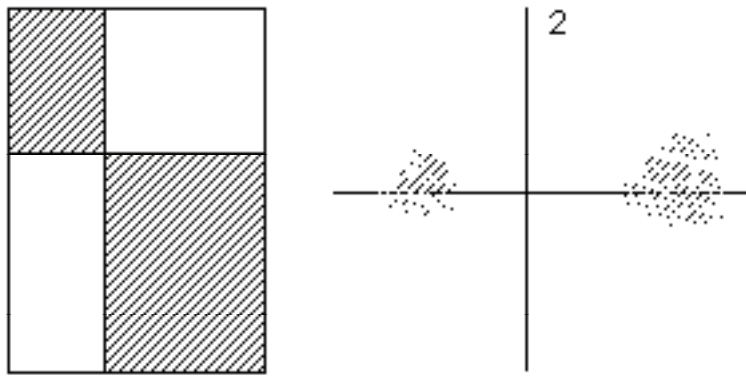


Fig. 2.2.4.4.2 b.

L'existence d'une boucle dans un cheminement peut révéler des indices qui dépendent des classes reliées.

La représentation graphique étant la caractéristique essentielle de l'analyse factorielle de correspondance, elle se prête aisément à toute manipulation tant formelle que graphique. Son analogie avec l'inertie mécanique permet l'utilisation de méthodes éprouvées; nous ne citerons que la construction de Mohr, ou cercles de Mohr, que l'on pourrait généraliser et devrait être d'un grand secours à la manipulation des données et à l'interprétation des résultats.

2.2.5 Autres méthodes d'analyse de données.

2.2.5.1 Analyse en composantes principales - ACP.

L'analyse en composantes principales est une méthode fondée sur le même principe de double analyse d'un nuage de points rapportés à des axes factoriels que l'analyse factorielle de correspondance. Toutefois, comme on ne retrouve pas la complète symétrie qui caractérise l'AFC, l'interprétation du graphique résultant devient plus difficile et parfois contestable car une des deux échelles est choisie arbitrairement.

Son intérêt réside dans le fait que, dans de nombreux cas, il est impossible de se ramener à un tableau de contingence et l'on désire, tout de même, disposer d'un graphique d'analyse factorielle.

Le tableau individus-caractères qui résulte d'un ensemble d'observations est hétérogène et nécessite d'être centré et réduit. Centrer un tableau consiste à déterminer la moyenne de chacun des caractères et à mesurer la distance de chaque individu par rapport à cette moyenne. Réduire un tableau exprime le fait de calculer l'écart type pour chacun des caractères et exprimer tous les éléments du tableau par une mesure unique qui est l'écart type.

L'analyse en composantes principales consiste à considérer le tableau centré et réduit comme représentatif d'un double nuage de points et en effectuer l'analyse factorielle selon la méthode utilisée en AFC.

2.2.5.2 Analyse discriminante - AD.

En fonction d'un certain nombre de critères quantitatifs mesurés sur un individu, l'analyse discriminante permet de le classer dans une catégorie généralement qualitative. Les problèmes justiciables de cette méthode s'énoncent sous la forme suivante: dans l'espace des critères, quel est l'axe, défini par ses composantes, sur lequel, en projetant tous les points individus, on obtient la meilleure discrimination en ensembles aussi séparés que possible correspondant aux différentes catégories. Le meilleur axe discriminant entre deux catégories de

population s'obtient en faisant le produit scalaire de la matrice V^{-1} , inverse de la matrice variance-covariance, par le vecteur qui joint les centres de gravité des sous-nuages de chaque catégorie [25].

La qualité de meilleure axe discriminant est mesurée par un critère chiffré appelé pouvoir discriminant D qui est la racine carrée du rapport D^2 , souvent appelé D^2 de Mahalanobis, de l'inertie du nombre des individus de chaque catégorie affecté au centre de gravité de son nuage, à l'inertie totale des points disposés sur l'axe.

Dans le cas général de p catégories, le vecteur joignant les centres de gravité des sous-nuages est remplacé par la matrice d'inertie G des p centres de gravité des sous-nuages. Il existe alors $p-1$ axes discriminants qui sont les $p-1$ axes d'inertie de la matrice $(X'X)-1G$. La matrice G est appelée matrice variance-covariance inter catégories ou interclasses. Le D^2 est alors la trace de la matrice $(X'X)G$ ou $V^{-1}G$ (voir 2.1.2).

2.2.5.3 L'analyse de variance - AV.

L'utilisation de l'analyse de variance est l'inverse de celle de l'analyse discriminante. Cette méthode s'applique au cas où la variable à expliquer est métrique alors que les variables explicatives sont nominales. Elle fait appel au théorème de Huygens et au test de Fisher- Snédécour.

Considérons un grand nombre n d'observations d'un caractère donné et l'on cherche à évaluer l'effet d'un autre caractère qui présente différentes modalités, en prenant soins d'éliminer au maximum l'effet des autres caractères ayant un effet possible sur le premier caractère au moyen d'un procédé approprié (permutation ou autre).

Appelons $\bar{x}$ la moyenne des n observations et $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_p$ les moyennes correspondant à chacune des modalités qui fait chacune l'objet de $n_1, n_2, \dots, n_p$ observations avec $n=n_1+n_2+\dots+n_p$. Le problème posé est de savoir si les p moyennes sont significativement différentes de, ce qui reviendrait à dire que les modalités du second caractère ont un effet sur le premier caractère.

La part de variance due à la première modalité est, en appliquant le théorème de Huygens:

$$[\Sigma(x - \bar{x}_1)^2 + n_1(\bar{x}_1 - \bar{x})^2] / n$$

On procède de même pour les autres modalités. La somme de ces différentes variances donne la variance totale V qui se décompose à son tour en deux variances:

- une variance intra catégorie, appelée résidu, calculée à partir des écarts de chaque observation avec la moyenne particulière de sa catégorie;
- une variance inter catégorie qui s'écrit:

$$[n_1(\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + n_2(\bar{x}_2 - \bar{x})^2 + \dots + n_p(\bar{x}_p - \bar{x})^2] / n$$

Le nombre de degré de liberté pour la variance intra catégorie est $n-p$ et celui de la variance inter catégorie $p-1$. Le F théorique de Fischer-Snédecour pour $p-1$ degrés de liberté au numérateur et $n-p$ au dénominateur correspondant à un effet nul donné par une table est à comparer à la quantité:

$$F = \frac{\text{Variance intercatégories} / (p-1)}{\text{Variance intracatégories} / (n-p)}$$

Si ce dernier F est supérieur au F théorique, on peut affirmer, au niveau de certitude choisi, que les modalités du second caractère ont un effet sur le premier.

Cette méthode prend tout son sens si l'ensemble des observations fait l'objet de K partitions croisées. Le théorème d'Huygens généralisé donne la variance totale à partir des k variances inter catégories $V_1, V_2, \dots, V_k$:

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_k + \text{résidu.}$$

à condition que les K variables explicatives soient indépendantes les unes des autres.

Les étapes de calcul sont alors les suivantes:

1- on détermine la variance totale V par référence à la moyenne générale de l'ensemble des observations;

2- on calcule chacune des K variances intercatégories $V_1, V_2, \dots, V_k$.

Pour la variable ou caractère j à p modalités ou catégories, la variance intercatégories correspondante est:

$$V_j = [n_1(\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + n_2(\bar{x}_2 - \bar{x})^2 + \dots + n_p(\bar{x}_p - \bar{x})^2] / n$$

3- Le résidu est la différence du premier calcul et de la somme des k seconds calculs.

4- Il existe alors k rapports F à considérer. Le dénominateur de ces rapports est égal à:

$$\frac{\text{Résidu}}{(n-1) - (p_1-1) - (p_2-1) - \dots - (p_k-1)}$$

avec $p_1, p_2, \dots, p_k$ le nombre de modalités de chacun des k caractères.

Pour le caractère j, le numérateur est:

$$\frac{\text{Variance intercatégorie}}{p_j - 1}$$

Le test de Fischer-Snédecor permet d'apprécier, au niveau de certitude choisi, la signification de chacun des caractères j.

2.2.5.4 L'analyse de proximités.

En statistiques, on fait souvent appel à la notion de distance car c'est un bon moyen d'évaluer l'image d'un individu par rapport à un autre ou par rapport à un ensemble. Il s'agit essentiellement d'une notion arbitraire donc subjective et l'on préfère parfois se contenter de l'ordre de ces individus, ce qui aboutit à des procédés que l'on désigne généralement par procédés non métriques d'analyse de proximités.

Les distances représentant les individus sont placées symétriquement par rapport à la diagonale d'une matrice carrée ayant les mêmes entrées en lignes et en colonnes. Cette matrice est transformée en une autre matrice contenant les produits scalaires des vecteurs dont les modules sont les distances citées. La matrice obtenue est la matrice variance-covariance, si la distance est euclidienne, du nuage de points recherché.

La diagonalisation de cette matrice fournit des valeurs propres qui, si elle sont au nombre de deux, ce qui est rare, permettent une représentation plane du nuage de points. Dans la plupart des cas on trouve même des valeurs propres négatives, ce qui montre l'impossibilité du problème. Si les deux premières valeurs

propres sont positives et nettement plus grandes que les autres, on peut considérer que la projection sur le plan des deux premiers axes définis par les premiers vecteurs propres est une bonne approximation de la représentation recherchée.

2.2.5.5 L'analyse canonique.

L'analyse canonique couvre le cas général où il y a plusieurs variables à expliquer. Les problèmes justiciables de cette méthode peuvent s'énoncer comme suit.

Pour n individus, deux ensembles de caractères p et q sont mesurés. En combinant les p caractères au moyen de coefficients $a_1, a_2, \dots, a_p$, il s'agit de construire un indice caractérisant ce premier ensemble de caractères. En procédant de même pour le second ensemble q avec des coefficients $b_1, b_2, \dots, b_q$, peut-on optimiser les coefficients a et b de manière à obtenir une corrélation maximale entre les deux indices caractérisants les deux ensembles de caractères.

Il est relativement aisé de remarquer que cette méthode revêt un caractère de grande généralité car elle regroupe l'ensemble des méthodes exposées précédemment à l'exception de l'A.C.P. [25]. Elle souffre cependant du fait qu'elle n'a pu trouver une présentation graphique satisfaisante des résultats et les cas d'applications pratiques sont assez rares.

En effet la loi de répartition d'un système, donnée par la fonction de répartition ou densité de probabilité, est une caractéristique complète du système. Cependant, il est rare que cette caractéristique complète puisse être utilisée car les données expérimentales trop pauvres ne permettent pas de trouver la loi de répartition, dans d'autres cas l'emploi d'un appareil aussi complexe que sont les lois de répartition ne se justifie pas par la précision médiocre exigée par les résultats.

Dans tous ces cas, au lieu des lois de répartition, on utilise une description approchée, incomplète, d'un système de variables aléatoires et ceci à partir d'un nombre restreint de caractéristiques numériques.

La matrice de variance-covariance de ce système, obtenue à partir de ces caractéristiques est appelée matrice de corrélation. Dans le cas de variables non corrélées, les éléments de la matrice de corrélation, sauf ceux de la diagonale, sont nuls. Afin de mieux faire apparaître la corrélation des variables aléatoires, indépendamment de leur dispersion, on utilise la matrice de corrélation normée r_{ij} [voir 2.2].

Lorsqu'il s'agit de plusieurs systèmes, on dit que les vecteurs aléatoires représentant chacun des systèmes ne sont pas corrélés si aucune des composantes d'un vecteur représentant un système n'est corrélée avec les composantes des autres vecteurs [26].

2.2.5.6 Aperçu sur d'autres méthodes d'analyse de données.

2.2.5.6.1 L'analyse des mesures conjointes.

Le cas le plus général où il y a plusieurs variables à expliquer est traité par l'analyse canonique. Dans le cas où une seule variable doit être expliquée, différentes possibilités se présentent:

- la variable à expliquer est métrique, les variables explicatives le sont également, c'est le domaine de la régression multiple;
- la variable à expliquer est métrique, les variables explicatives sont nominales, l'analyse de variance est la plus appropriée;
- la variable à expliquer est nominale alors que les variables explicatives sont métriques, on a recours à l'analyse discriminante;

-la variable à expliquer est nominale de même que les variables explicatives. Ce cas précis correspond au domaine de prédilection de la méthode dite des mesures conjointes. Ce problème n'a reçu de réponse satisfaisante que dans le cas où les variables sont ordinales.

2.2.5.6.2 Typologie, segmentation et classification.

L'idée est de ranger les individus dans des classes aussi nettement différenciées que possible. Pour les sciences dites exactes, il s'agit évidemment de classification et cette notion est indissociable de la science. Dans d'autres domaines tels que les sciences humaines ou industrielles, les frontières, bien que souvent arbitraires, qui servent de base à la classification deviennent des plus floues. Ceci implique, si l'on demande à l'analyse de données une classification automatique, de le faire seulement dans une optique déterminée et en vue d'une application précise.

La segmentation, qui est la plus simple des trois démarches citées en titre, consiste à sélectionner les caractères des variables un par un au lieu de les combiner comme l'analyse discriminante, les critères retenus sont toujours basés sur la notion de distance mesurée sur les variables expliquées.

La typologie est une démarche apparentée mais différente dans la mesure où aucun caractère ou groupe de caractères n'est considéré de façon privilégiée par rapport aux autres. On cherche simplement, à partir d'un ensemble de départ, à constituer un certain nombre de sous-groupes à l'intérieur desquels les individus sont les plus semblables possible et donc aussi différents que possible des individus des groupes voisins. Ceci amène à définir un indice de similarité, ce qui revient à définir une distance en fonction des caractères considérés.

On peut procéder de deux manières différentes:

- d'une manière ascendante, ou hiérarchique, en partant d'individus isolés qui sont agrégés par paquets composés d'individus proches les uns des autres au sens de la distance définie et en remontant aux sous-groupes, aux groupes et enfin à l'ensemble complet.
- d'une manière descendante, ou nodale, en partitionnant l'ensemble de départ en groupes, sous-groupes jusqu'à l'individu.

Parmi les nombreuses propositions, nous citerons à titre indicatif deux procédés; le premier, l'agrégation selon la variance, utilise la manière ascendante; le second, l'agrégation autour de centres de variables, la manière descendante.

2.2.5.6.2.1 Agrégation selon la variance.

Partant d'un nuage de points massifs, on procède par étape en regroupant les points de manière à diminuer le moins l'inertie totale du nuage, qui n'est autre que la variance. A la première étape, on choisit le couple de points dont l'inertie est la plus faible que l'on remplace par un point de masse égale à la somme des deux masses, situé au centre de gravité du couple; et l'on recommence ainsi jusqu'à épuisement de tous les points.

Dans le cas d'une AFC, les inerties étant proportionnelles au χ^2 , l'opération revient à adopter la perte de χ^2 minimale comme critère pour chaque étape.

2.2.5.6.2.2 Agrégation autour de centres de variables.

A chaque étape, on fixe un nombre p de sous-nuages et l'on positionne au mieux leurs p centres en tenant compte des contraintes

du problème. Les distances des n points du nuage au p centres sont calculées par l'indice de similarité retenu et chaque point est rattaché au centre dont il est le plus proche. On obtient ainsi p sous-nuages avec p centres de gravité qui remplacent les p centres choisis au départ et l'on recommence l'opération qui est rapidement convergente.

L'étape suivante consiste à choisir p' centres et reprendre le processus.

Afin de limiter l'arbitraire lié à cette méthode, on peut faire varier le nombre p de centres et l'on constate que certains groupes se retrouvent toujours quel que soit le nombre de centres choisis; on les appelle les formes fortes qui représentent des agrégats naturels.

Différentes variantes de cette méthode existent et est souvent désignée sous le nom de méthode des nuées dynamiques.

2.2.5.6.3 Analyse de préférence. Méthodes de classement.

Le classement par ordre de préférence est une nécessité de l'industrie. Toute décision est subordonnée à un choix, et tout choix impose des critères de choix. En présence de plusieurs critères contradictoires, il est nécessaire de trancher, c'est-à-dire d'accorder un poids à chacun des critères.

Les méthodes proposées pour faciliter la résolution de tels problèmes diffèrent largement de celle de l'analyse des données. Nous retiendrons que deux principes essentiels:

- la somme pondérée des rangs est préférable à la moyenne pondérée des notes;
- les critères positifs doivent être traités différemment des critères négatifs; les premiers peuvent s'additionner, pas les seconds.

2.3 Tableau récapitulatif.

Ce tableau, extrait de l'ouvrage « Information et décision en Marketing » par Y. Evrard et P. Lemaire [36], résume parfaitement les notions traitées et leurs rapports mutuels.

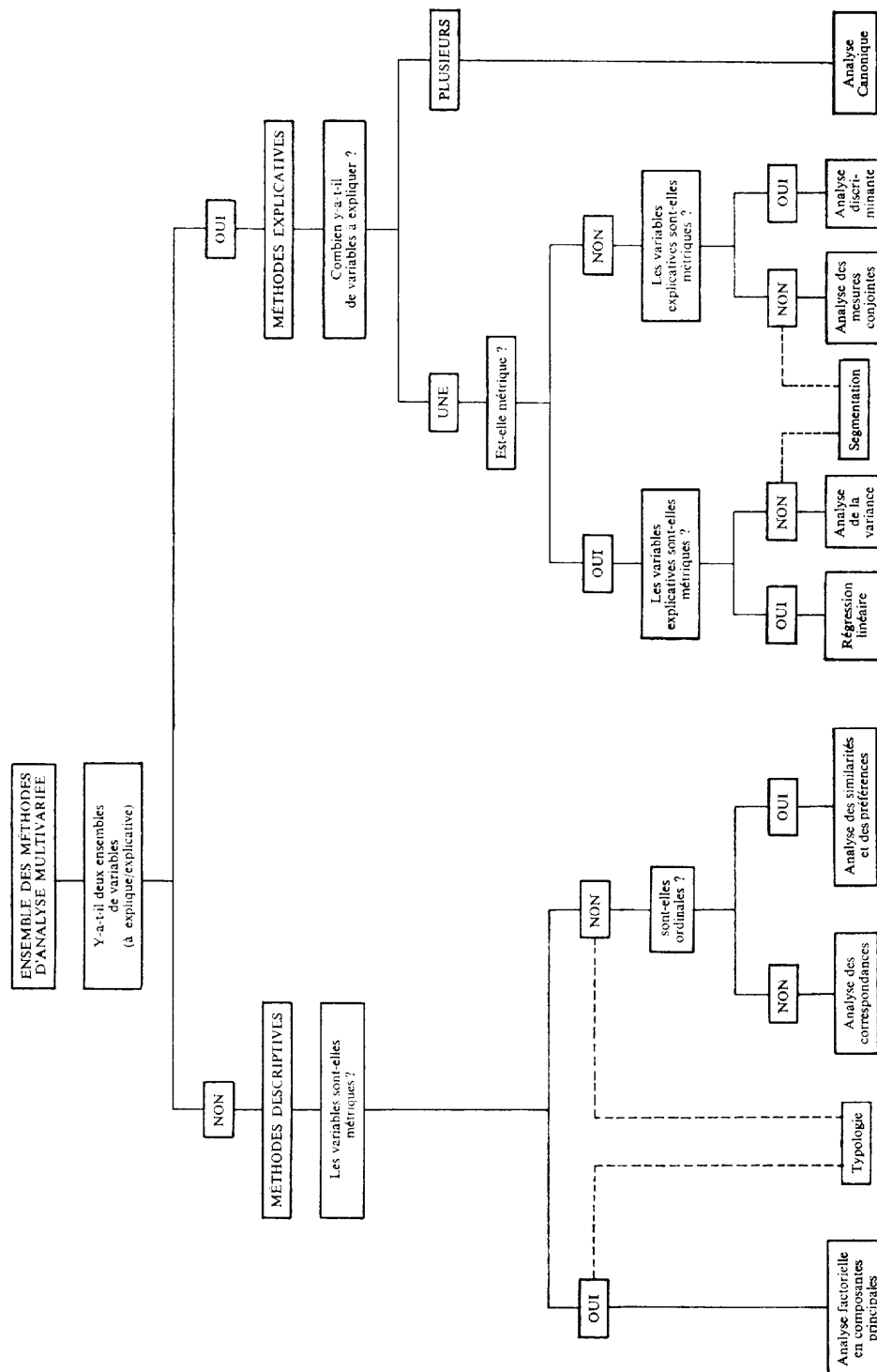


Fig 2.3.1 Classification des méthodes d'analyse multivariée.

Chapitre 3

MESURE ET ANALYSE DES CARACTERES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DU CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL .

3.1 Mesures des caractéristiques physiques et chimiques du ciment portland artificiel.

Les principaux types de mesures retenues pour le contrôle du ciment en usine sont de trois ordres :

- les mesures sur la composition chimique du produit fini dont les variations la qualité du ciment. Cette composition dépend essentiellement de la qualité du minerai et des ajouts de correction ;
- les mesures sur la composition minéralogique donnent des indications sur le traitement du minerai dans tout le processus de fabrication ;
- enfin les mesures physiques, qui se résument en des essais normalisés, sont déterminants pour la vérification de la qualité attendue du ciment.

Il va de soi que toutes ces mesures sont interdépendantes et leur dissociation n'est qu'un moyen pratique de s'assurer au plus tôt d'obtenir un résultat aussi proche que possible du produit espéré.

Nous avons rassemblé les observations quotidiennes de deux années entières de fabrication de ciment portland artificiel ordinaire de la classe 400 entreprises systématiquement dans une cimenterie, en l'occurrence la cimenterie de Ain Touta.

Afin d'éviter une trop grande dispersion due aux aléas de la production quotidienne, nous avons choisi arbitrairement de regrouper les résultats en moyenne arithmétique mensuelle, ce correspond également au choix pratique adopté par les opérateurs de l'usine, par souci de gestion.

Deux différentes séries de mesures, sur les mêmes paramètres, ont été entreprises :

- des mesures à la phase finale de la fabrication qui correspond à la sortie du broyeur de clinker ;
- des mesures à la phase expédition du produit vers l'utilisateur final après mise en entrepôt pour une durée approximative de soixante douze heures.

Cette différenciation des mesures a un sens la mesure où un stabilisation s'opère après refroidissement, ce qui sera d'ailleurs confirmé par l'étude qui va suivre.

Le souci d'une représentation claire des observations nous a imposé de normer les mesures par rapport à leur maximum, ce qui nous a permis de représenter sur les mêmes graphiques les variations de grandeurs d'échelle totalement incompatibles.

La lecture est assez aisée puisqu'il suffit de lire la valeur de la grandeur considérée sur le graphe et de la multiplier par la valeur maximum correspondante donnée en bas du graphe.

Nous avons jugé utile de scinder la représentation en six graphes différents qui correspondent aux mesures chimiques sur les composés principaux ; aux mesures chimiques sur les composés secondaires, appelés composés mineurs ou alcalis ; aux mesures physiques secondaires censés donner des indications sur le comportement du ciment en tant que produit isolé et enfin aux mesures de résistance à la compression et à la flexion telles que définies de manière standard .

Légende

%SiO₂ : quantité relative de silice.

%Al₂O₃ : quantité relative d'alumine.

%Fe₂O₃ : quantité relative de ferrite.

%CaO : quantité relative de chaux.

%MgO : quantité relative de magnésie.

%K₂O : quantité relative d'oxyde de potassium.

%Na₂O : quantité relative d'oxyde de sodium.

%SO₃ : quantité relative de sulfates .

%Rés.Insol . : quantité relative de résidus insolubles.

P.F.1000°C : perte au feu à 1000°C.

P.F.1200°C : perte au feu à 1200°C.

SSB Blaine : surface spécifique Blaine (cm²/g).

Rés.45m : résidu à 45 µm.

%Chaux libre : quantité relative de chaux libre.

%Eau : quantité relative d'eau résiduelle dans la poudre de ciment.

Déb.prise : début de prise de la pâte de ciment (en mn).

Fin.prise : fin de prise de la pâte de ciment (en mn).

Exp.Le Chatelier : expansion selon Le Chatelier.

Rés.Comp.2j : résistance à la compression à 2 jours (kgf/cm²).

Rés.Comp.7j : résistance à la compression à 7 jours (kgf/cm²).

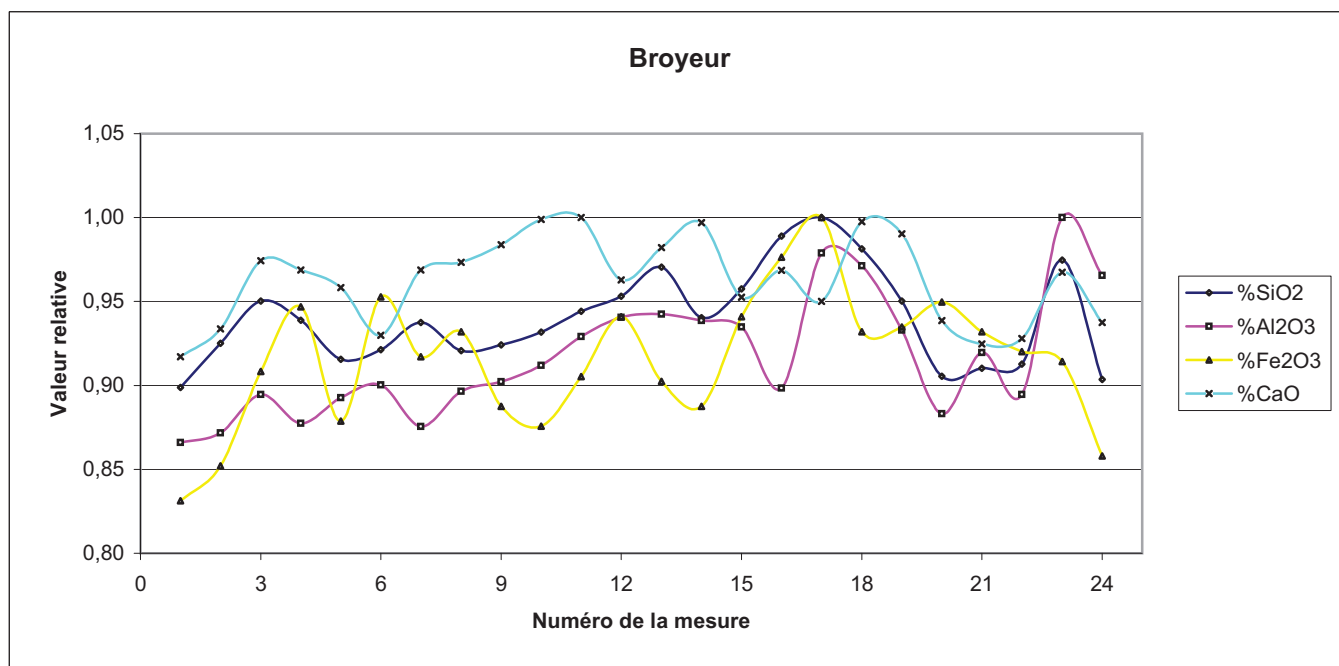
Rés.Comp.28j : résistance à la compression à 28 jours (kgf/cm²).

Rés.Flex.2j : résistance à la flexion à 2 jours (kgf/cm²).

Rés.Flex.7j : résistance à la flexion à 7 jours (kgf/cm²).

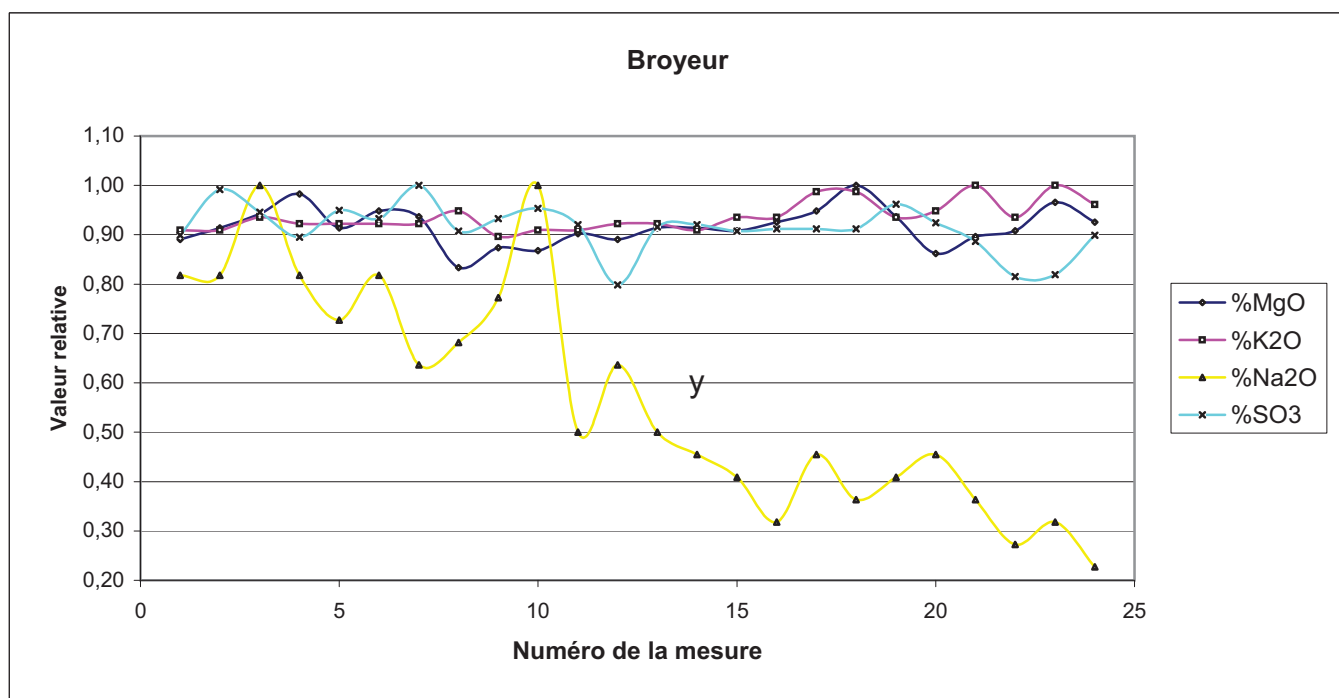
Rés.Flex.28j : résistance à la flexion à 28 jours (kgf/cm²).

Les unités non mentionnées sont en masse.



Graphe 1

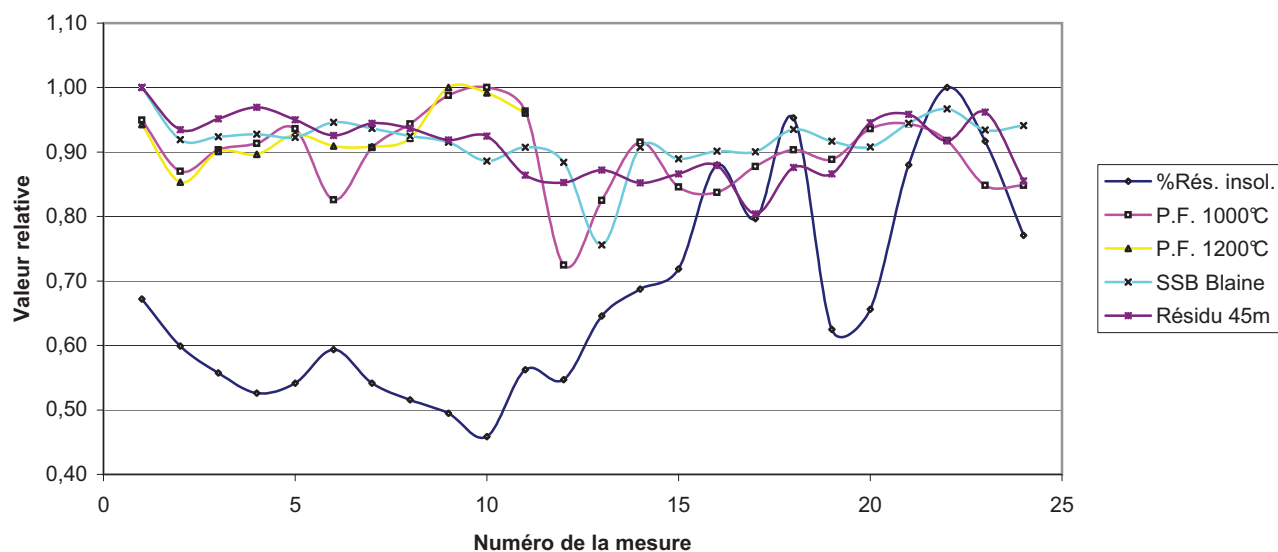
Variable	%SiO2	%Al2O3	%Fe2O3	%CaO
Maximum	20,94	5,22	3,38	67,74



Graphe 2

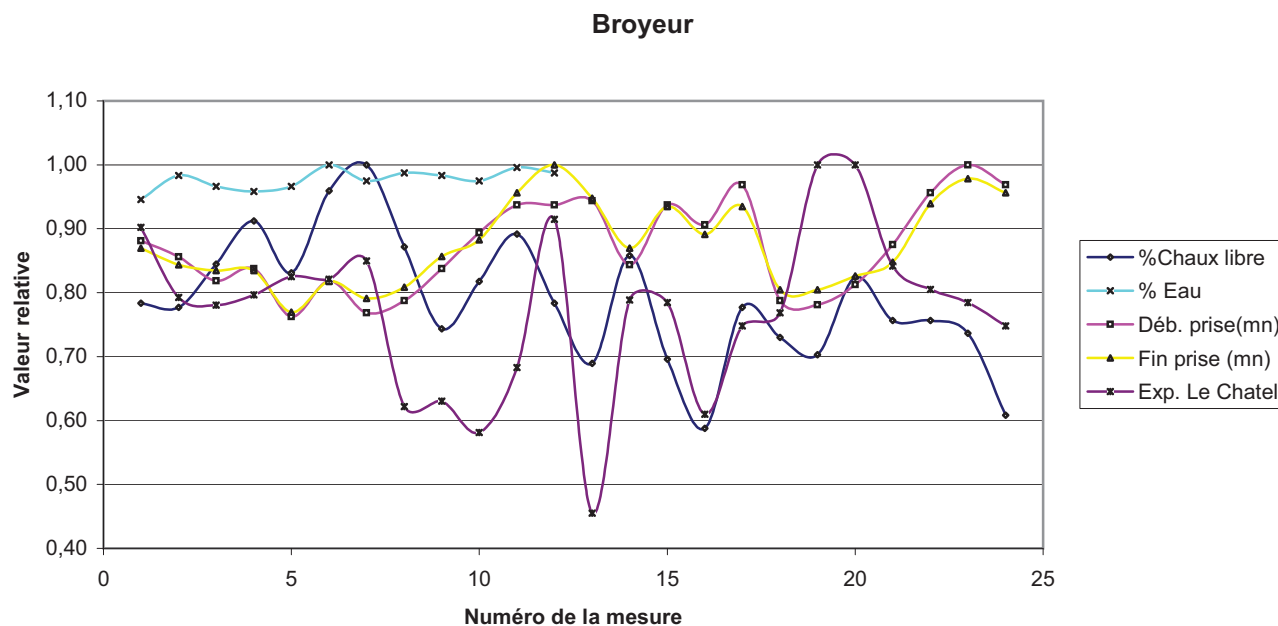
Variable	%MgO	%K2O	%Na2O	%SO3
Maximum	1,74	0,94	1	2,29

Broyeur



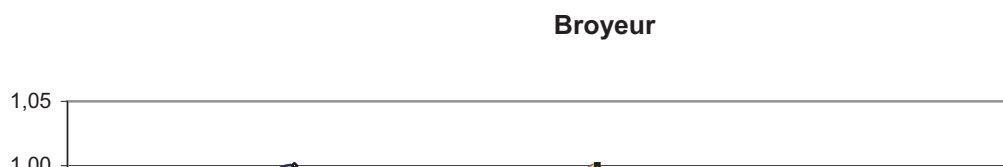
Graphe 3

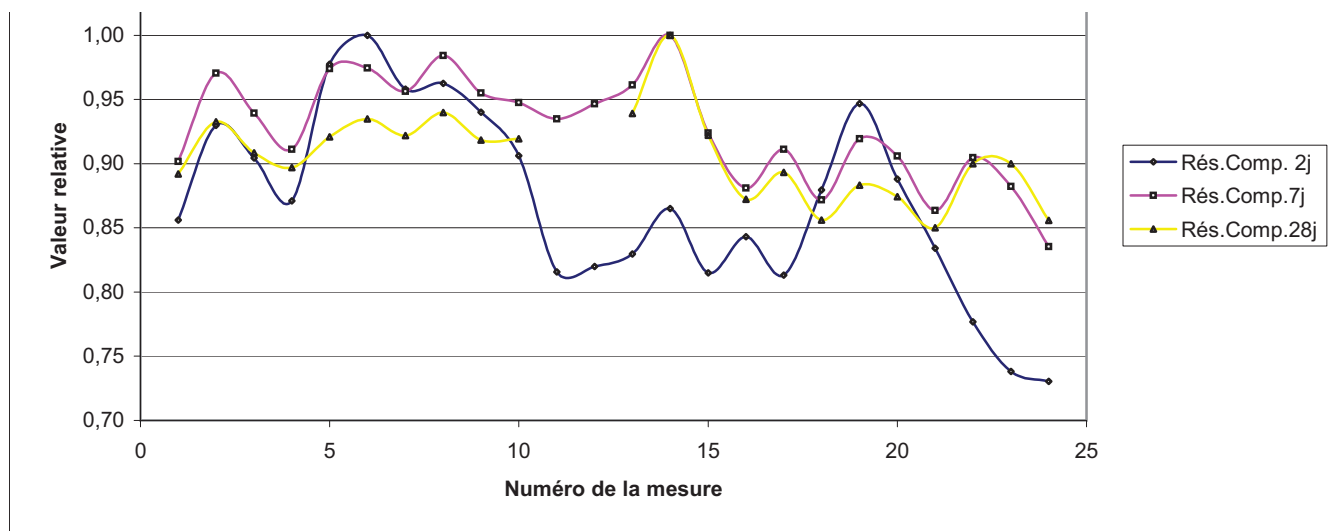
Variable	%Rés. insol.	P.F. 1000°C	P.F. 1200°C	SSB Blaine	Résidu 45m
Maximum	1,92	8,17	8,39	3705	28,21



Graphe 4

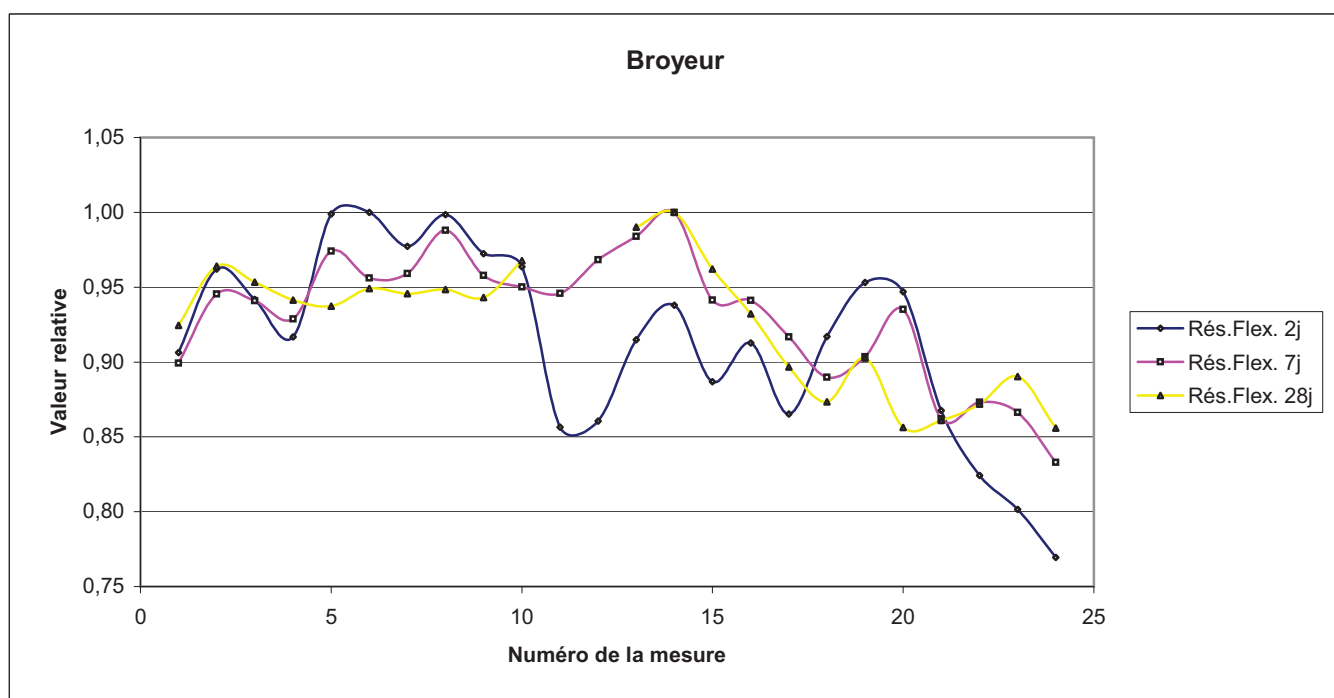
Variable	%Chaux libre	% Eau	Déb.prise(mn)	Finprise (mn)	Exp.Le Chat.
Maximum	1,32	23,8	160	230	2,46





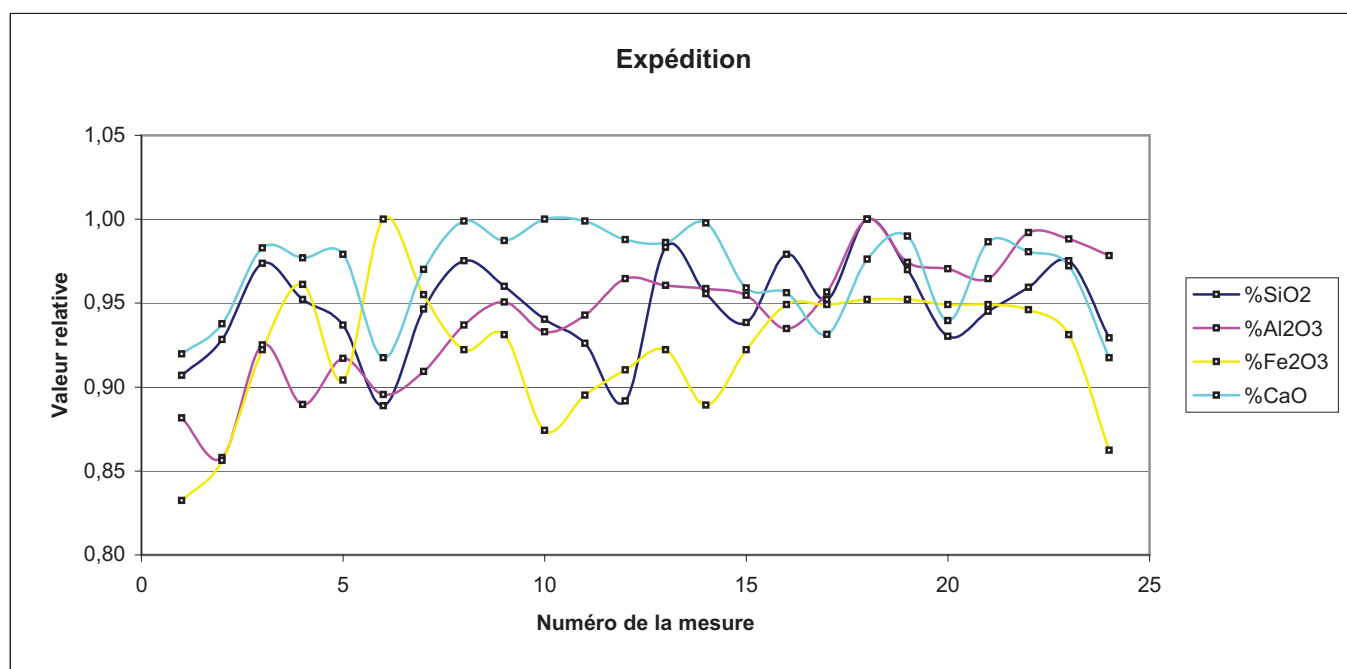
Graphe 5

Variable	Rés.Comp. 2j	RésComp.7j	RésComp28j
Maximum	215,69	355,55	467,51



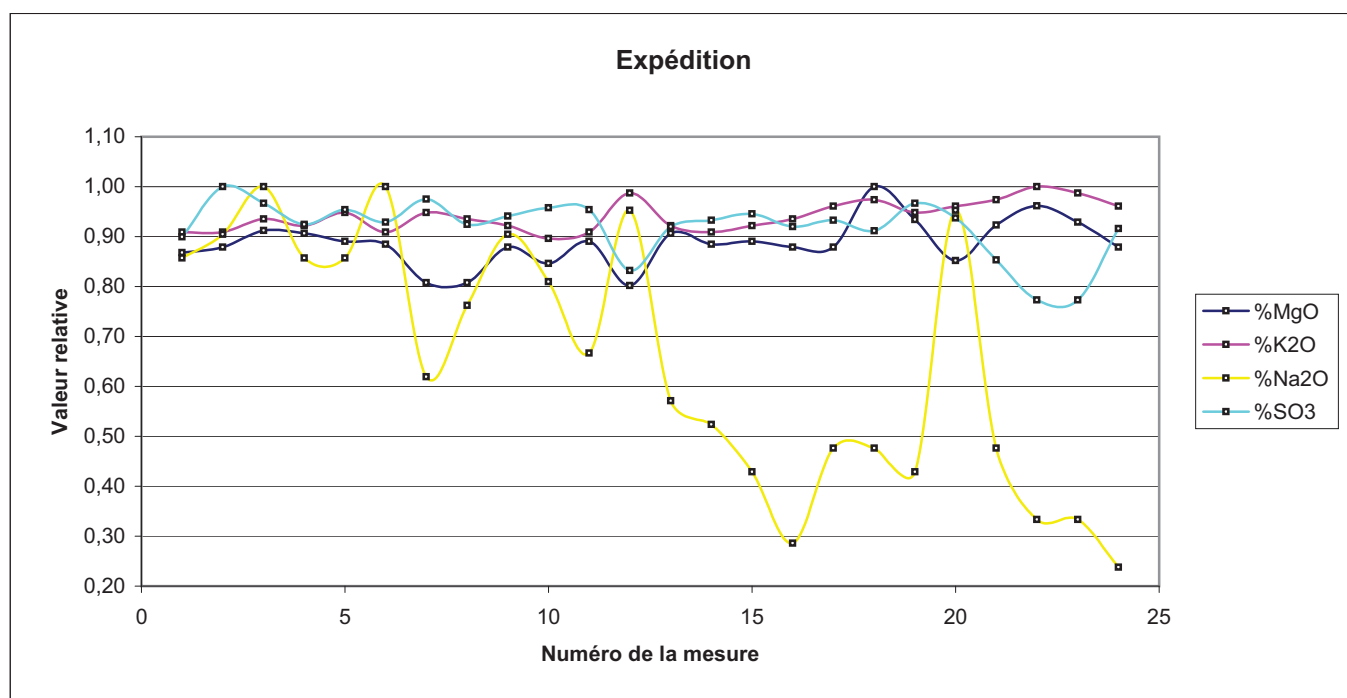
Graphe 6

Variable	Rés.Flex. 2j	Rés.Flex. 7j	Rés.Flex. 28j
Maximum	45,7	66,3	80,58



Graph 1

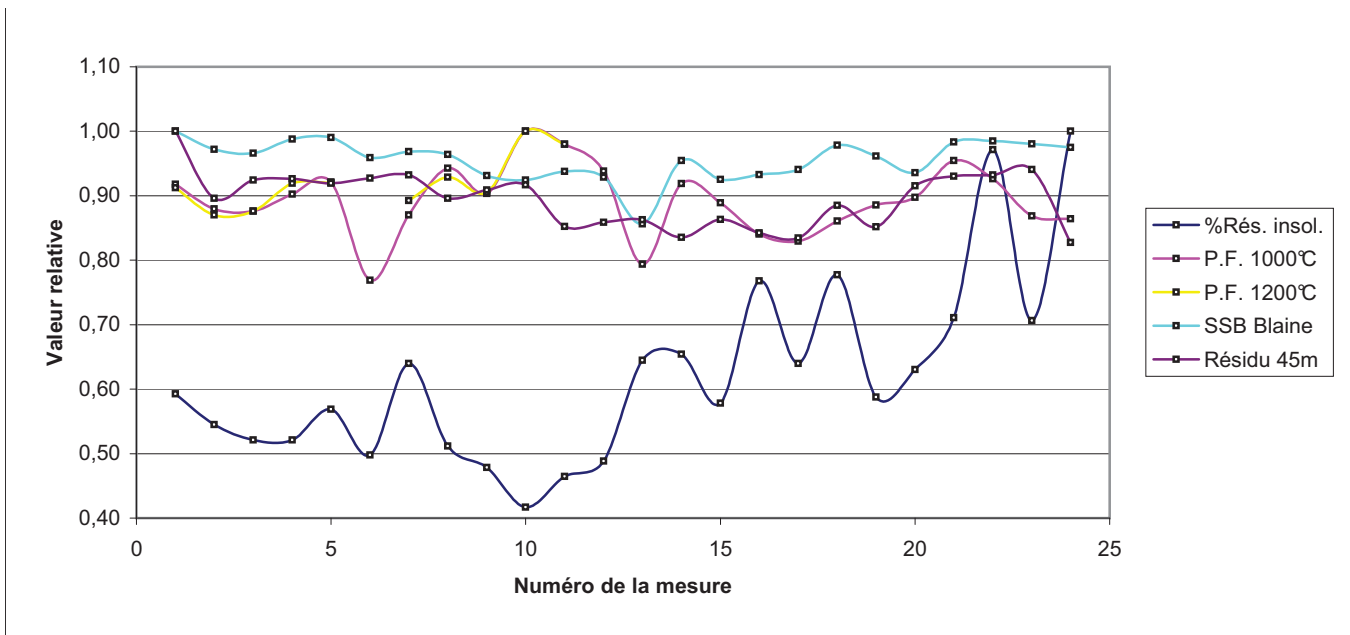
Variable	%SiO2	%Al2O3	%Fe2O3	%CaO
Maximum	20,95	5,07	3,34	68,12



Graph 2

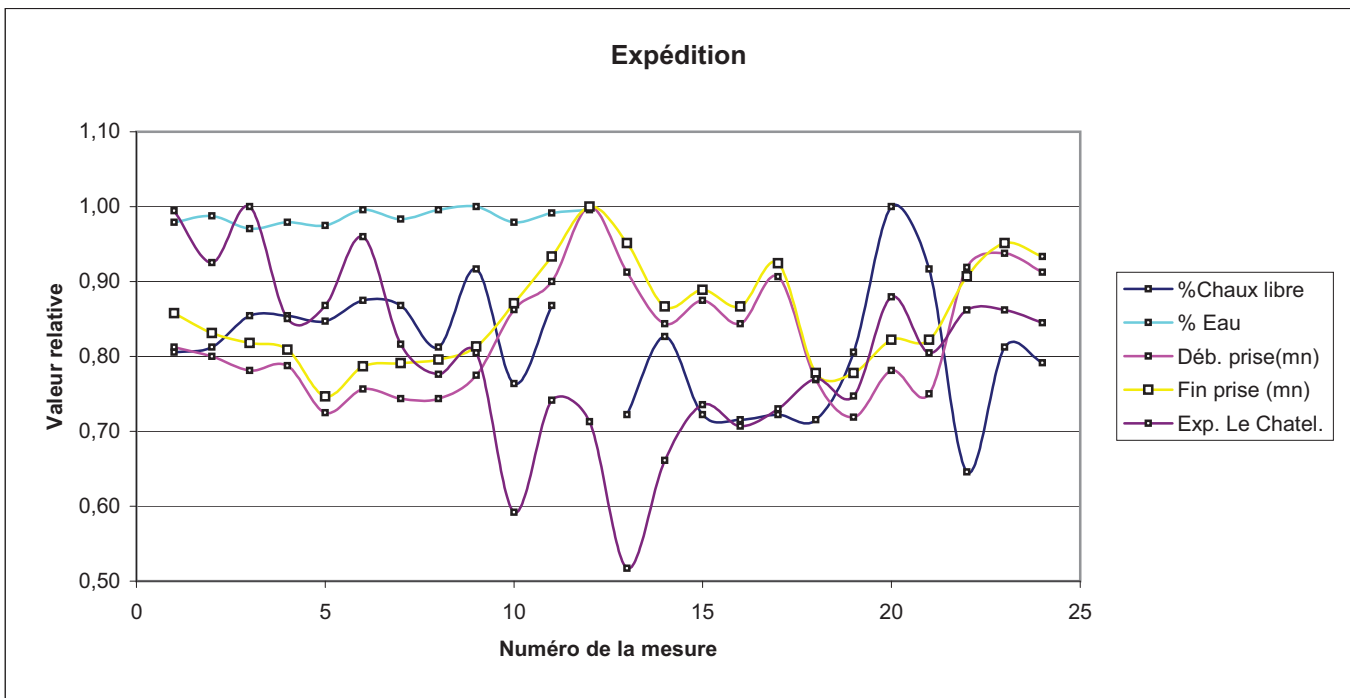
Variable	%MgO	%K2O	%Na2O	%SO3
Maximum	1,82	0,77	0,21	2,32





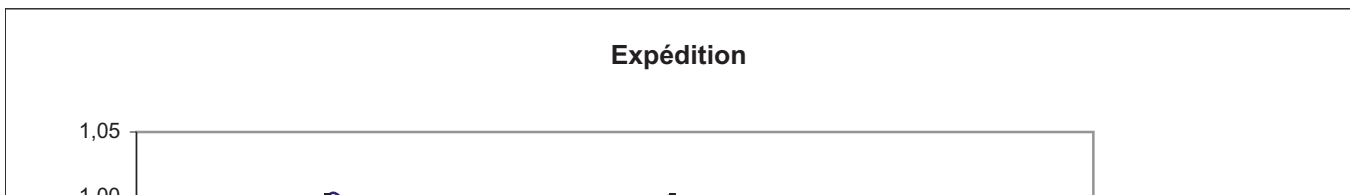
Graph 3

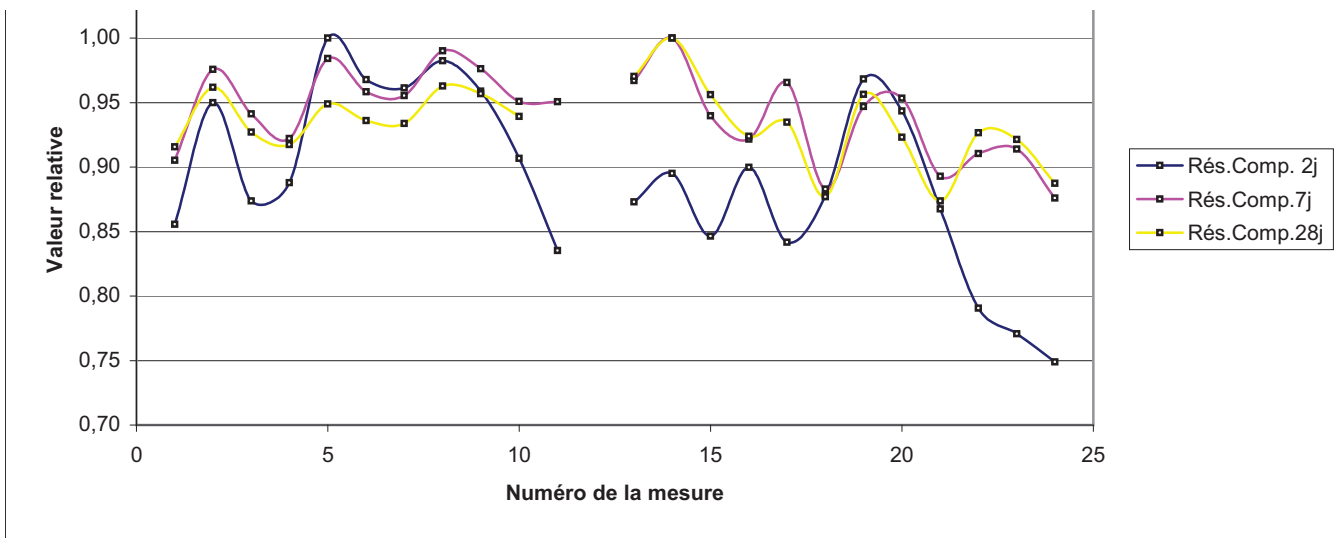
Variable	%Rés. insol.	P.F. 1000°C	P.F. 1200°C	SSB Blaine	Résidu 45m
Maximum	2,11	8,39	8,54	3837	26,04



Graph 4

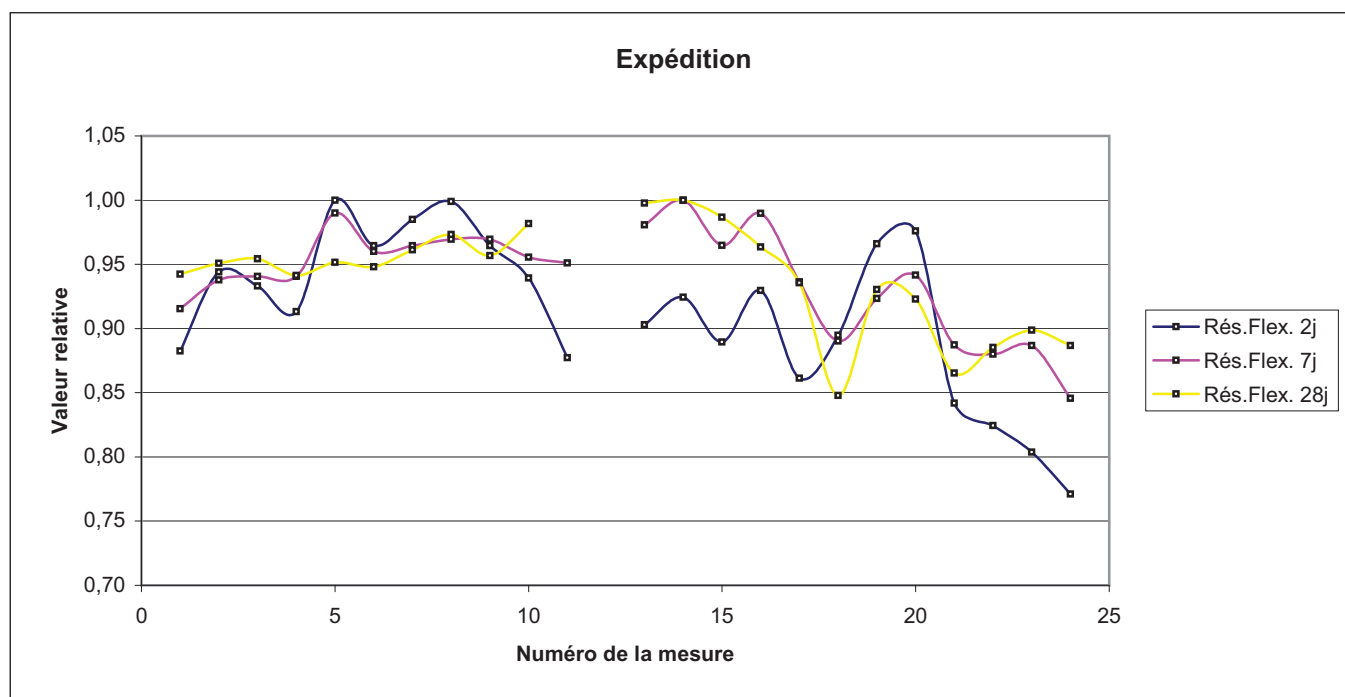
Variable	%Chaux libre	% Eau	Déb. prise(mn)	Fin prise (mn)	Exp. Le Chat.
Maximum	1,44	23,9	160	225	1,67





Graph 5

Variable	Rés.Comp. 2j	Rés.Comp. 7j	Rés.Comp. 28j
Maximum	231,98	357,5	461,52



Graph 6

Variable	Rés.Flex. 2j	Rés.Flex. 7j	Rés.Flex. 28j
Maximum	48,73	66,98	80,48

3.2 Analyse comparative des mesures.

3.2.1 Analyse en composantes principales.

L'analyse factorielle est une méthode de réduction de données qui permet de ne retenir que les variables les plus pertinentes et éviter ainsi les mesures redondantes par la recherche de corrélations entre les variables.

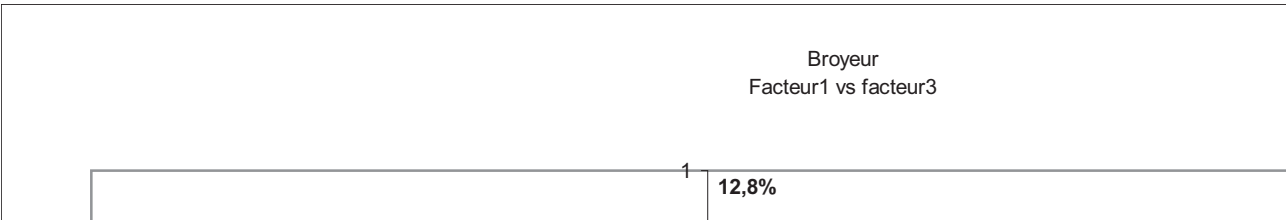
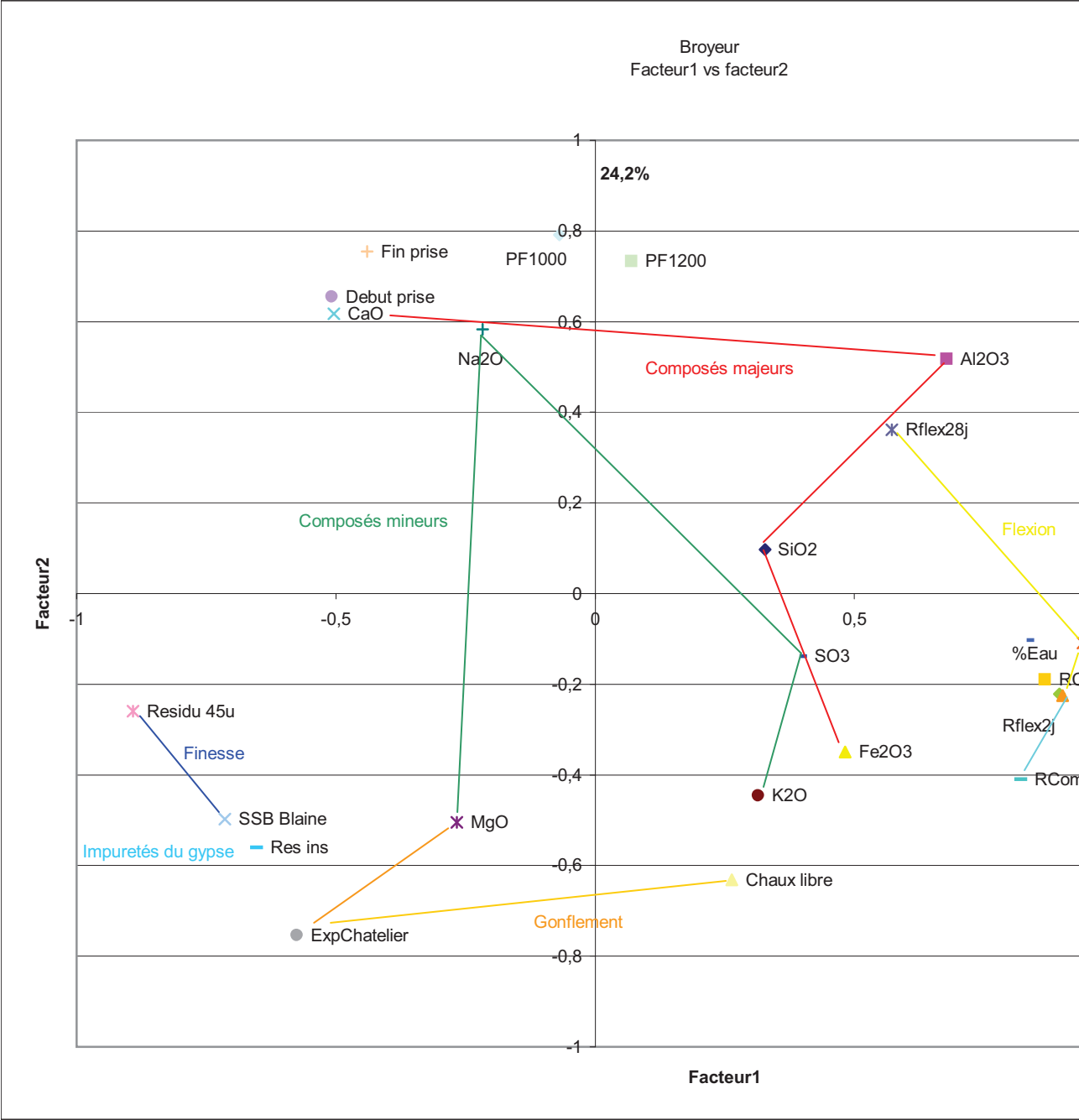
Les variables étant métriques et non ordinales, la méthode comparative la plus appropriée nous semble être l'analyse en composantes principales, l'A.C.P. (voir chapitre 2). Ce choix est justifié par deux raisons essentielles :

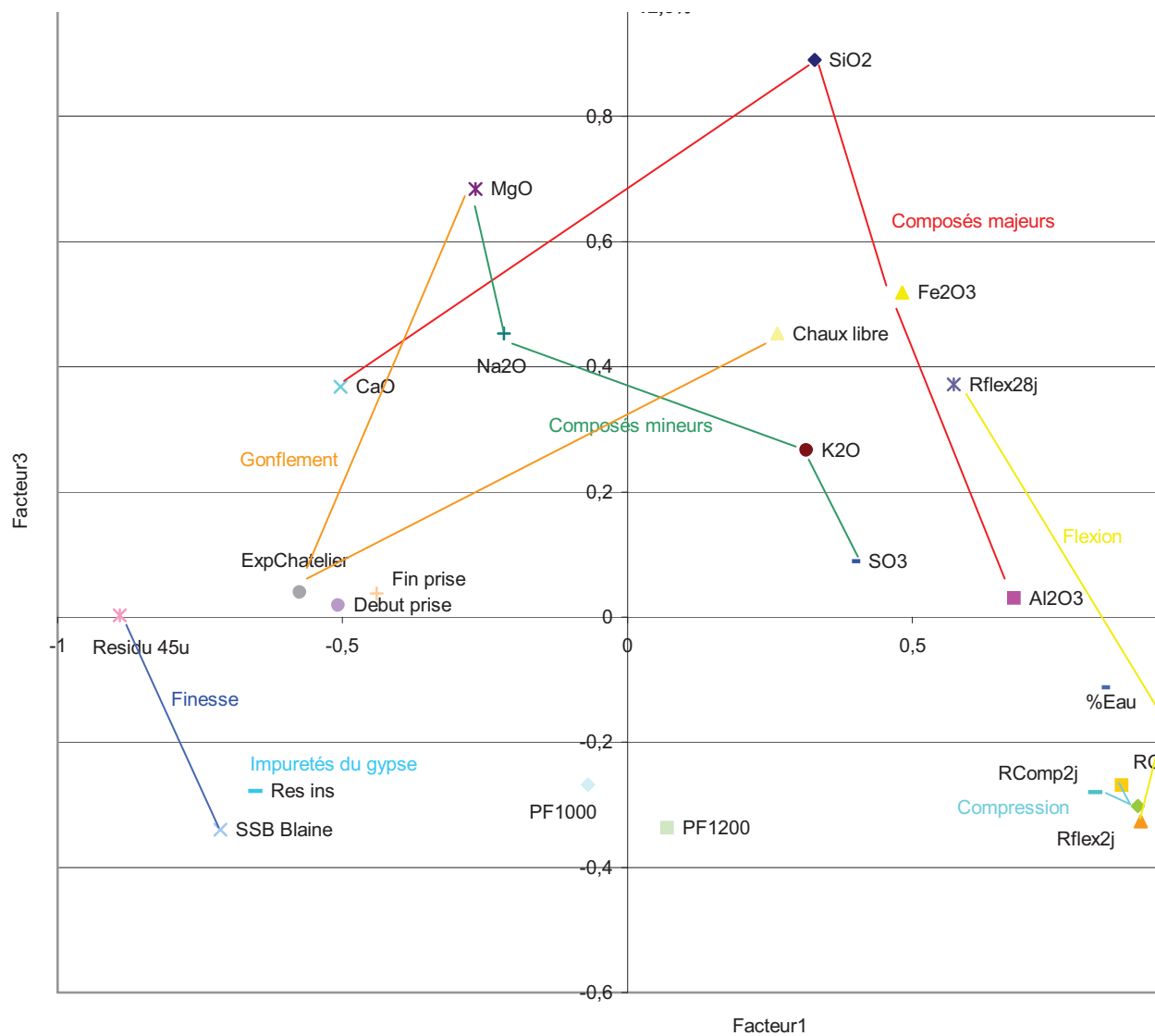
- nous ne recherchons pas des correspondances absolues entre les variables, ce qui serait illusoire, mais un moyen de réduire la recherche d'interdépendance des variables afin de focaliser cette recherche aux variables dont la corrélation en terme de variance est la plus significative ;
- d'autres analyses imposent une décomposition des mesures en intervalles arbitraires, appelés catégories, par l'utilisation de fréquences inter-catégories, ce qui escamoterait les variations fines objet de notre étude.

La connaissance, à travers de nombreuses études, de la nature des différents paramètres mesurés sur le ciment portland artificiel nous permet de nous passer des différentes méthodes d'extraction des facteurs proposées par l'A.C.P. Ces méthodes sont basées sur l'analyse purement statistique du comportement des variables ; nous avons choisi de nous intéresser à leur variation en fonction de leur nature physique.

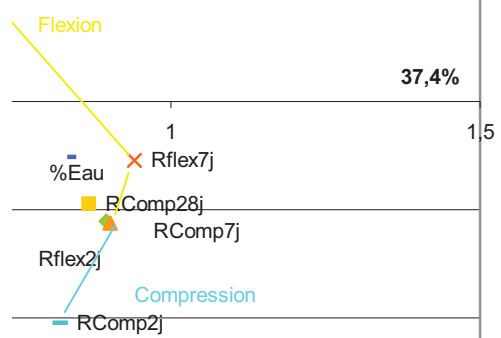
Nous avons limité le nombre de facteurs à trois qui expliquent 75% de la variance. En fait le premier plan factoriel explique à lui seul 62% de la variance ; le second plan n'a été retenu que pour vérifier l'inexistence d'effet de parallaxe.

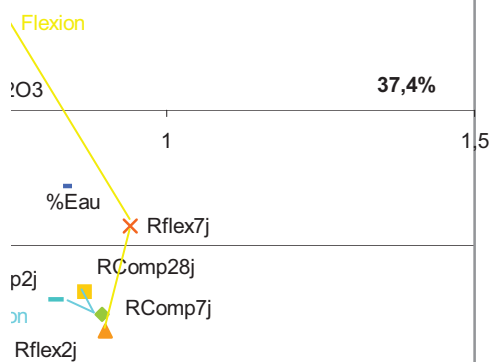
Il est à remarquer que l'analyse des corrélations des composants minéralogiques nous semble inutile dans la présente étude car nous disposons de relations avérées entre ces composants et les composants chimiques du ciment (voir chapitre 1).

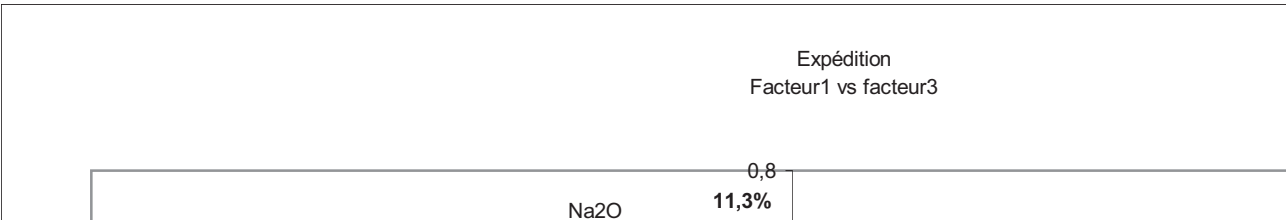
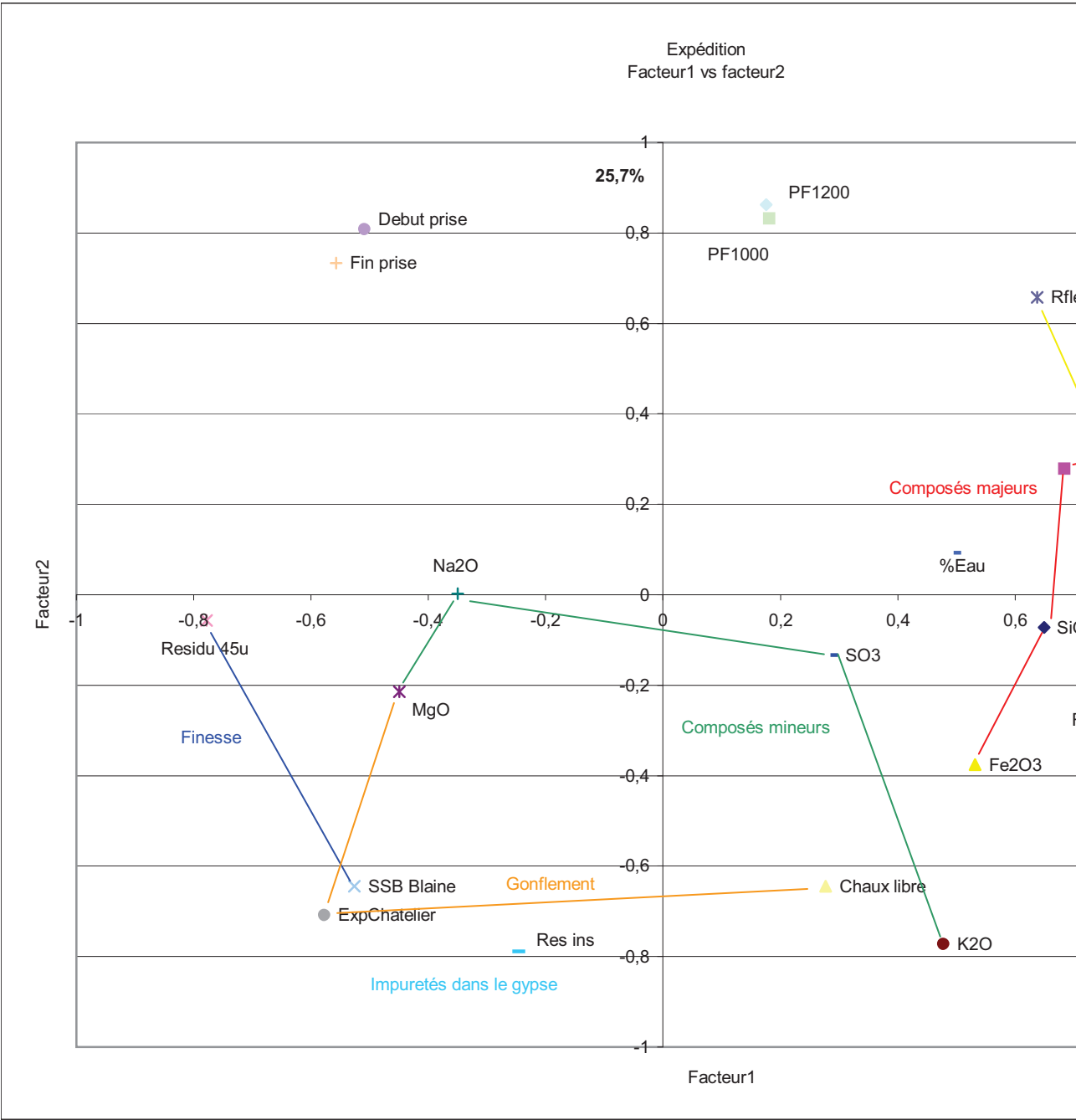


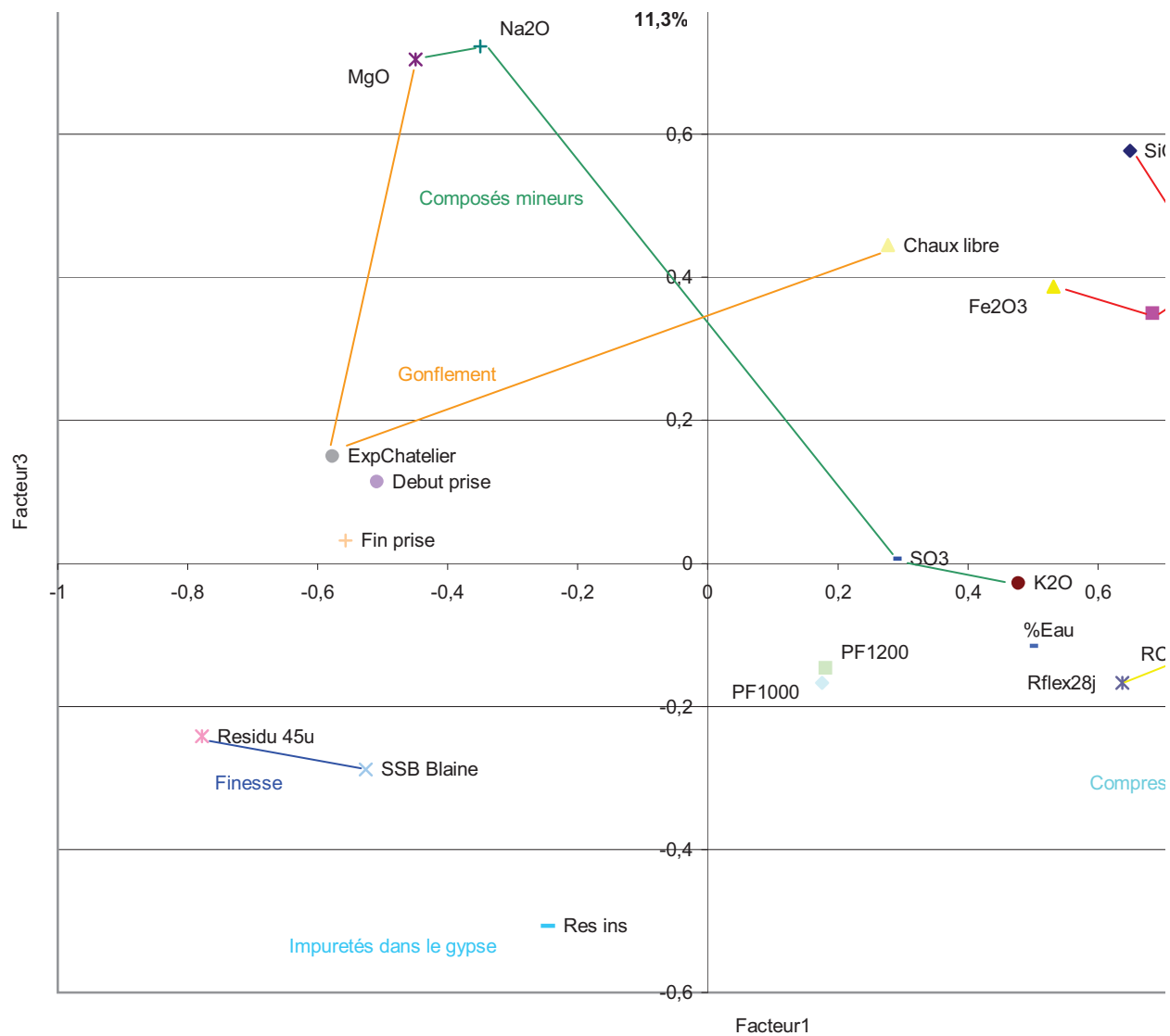


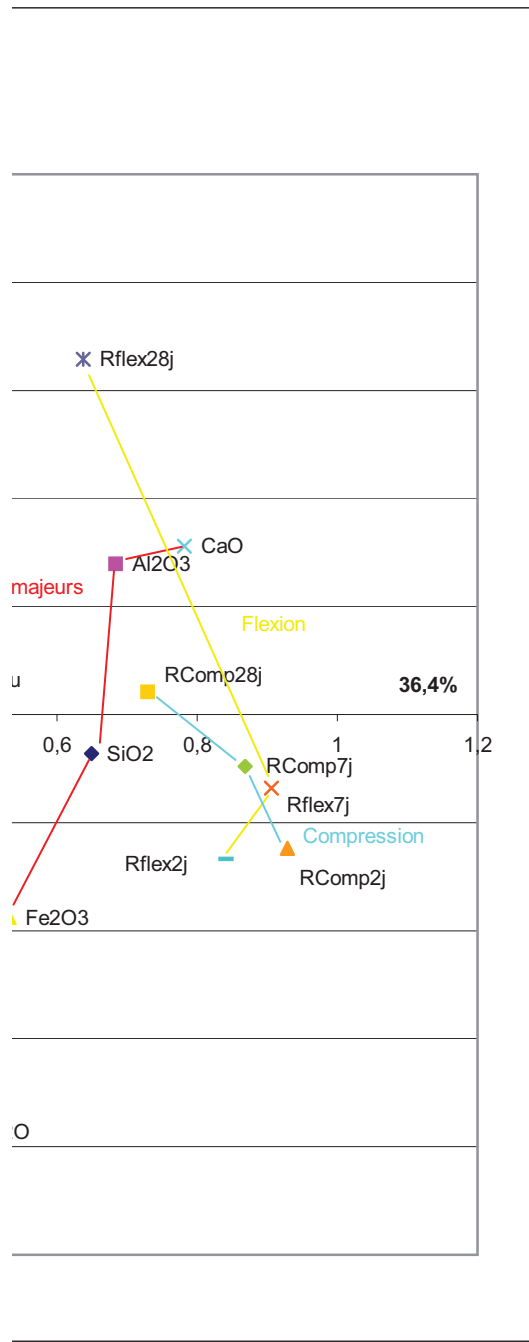
203

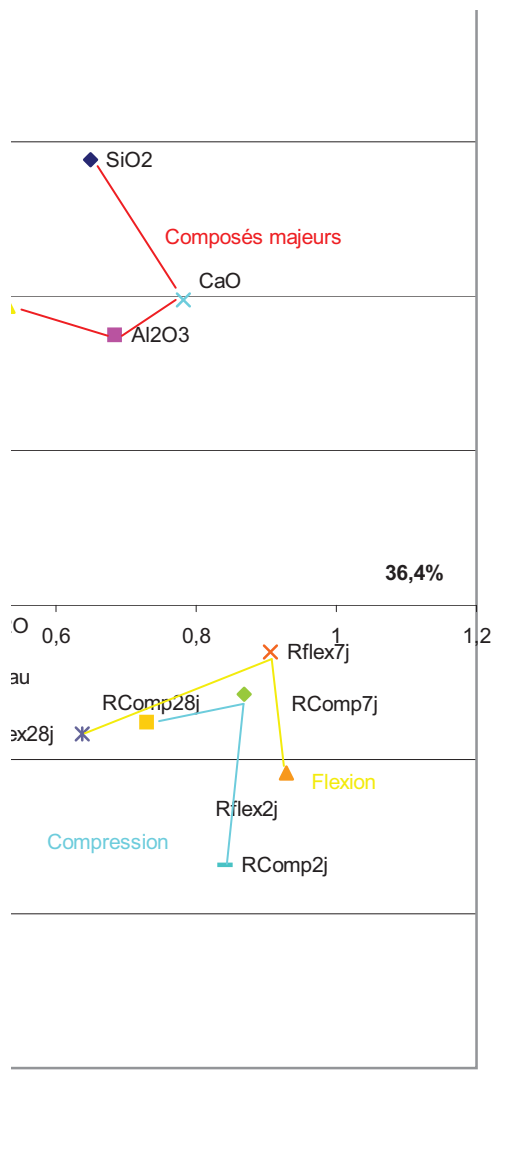












3.2.2 Interprétation des résultats de l'analyse.

Nous ne recherchons pas une interprétation physique des interactions entre les différentes variables mais plutôt la forme mathématique de ces interactions utilisable à des fins prévisionnelles.

3.2.2.1 Mesures à la sortie du broyeur.

Les résultats graphiques de l'analyse sont remarquables car ils font apparaître plusieurs regroupements attendus, ce qui constitue en soi une confirmation de la validité de la méthode pour le problème traité.

Quatre groupes de paramètres apparaissent nettement dans les deux plans factoriels retenus (Graphe Broyeur Fact1 vs Fact2 et Graphe Broyeur Fact1 vs Fact3).

- 1^{er} groupe : a) Résidus insolubles ;
b) Surface spécifique Blaine ;
c) Résidus à 45 μm ;
d) Expansion Le Chatelier.
- 2^{ème} groupe : a) proportion d'eau résiduelle dans le ciment ;
b) résistance à la compression à 2 jours ;
c) résistance à la compression à 7 jours ;
d) résistance à la compression à 28 jours ;
e) résistance à la flexion à 2 jours ;
f) résistance à la flexion à 7 jours.
- 3^{ème} groupe : a) CaO ;
b) Na_2O ;
c) Perte au feu à 1000°C ;
d) Perte au feu à 1200°C ;
e) Début de prise ;
f) Fin de prise.
- 4^{ème} groupe : a) SiO_2 ;
b) Fe_2O_3 ;
c) K_2O ;
d) SO_3 ;
e) CaO libre.

Il serait donc pertinent de chercher une relation métrique entre les variables de chaque groupe par une régression polynomiale par exemple. Une régression linéaire, logarithmique ou exponentielle rentrent dans ce cadre si l'on peut se contenter d'une approximation, ce qui est le cas dans la présente étude. Une étude plus précise pourrait être entreprise ultérieurement.

Le premier et le second groupe cités s'opposent par rapport au second et troisième axe factoriels, il serait intéressant de vérifier si cela ne correspond pas à une relation particulière entre ces deux groupes. Il en est de même pour K_2O , SO_3 et entre MgO et Na_2O qui pourtant sont souvent considérés comme ayant des comportements similaires dans le ciment.

Les variables de chaque groupe sont croisées entre-elles par des régressions linéaires dans les graphes 1 à 4 (broyeur) ; les graphes 5 et 6 (broyeur) croisent les variables opposées par rapport aux axes factoriels.

3.2.2.2 Mesures à l'expédition du ciment.

Après stabilisation, le comportement du ciment diffère notablement par rapport à son comportement à la sortie du broyeur (Graphe Expédition Fact1 vs Fact2 et Graphe Expédition Fact1 vs Fact3) :

- CaO rejoint le groupe des composés principaux (SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3) ;
- La résistance à la flexion à 28 jours se retrouve à proximité des autres mesures de résistance ;

- la chaux libre qui semble se rapprocher de K_2O et SO_3 dans le plan factoriel 1-2 s'éloigne de ces deux variables dans le plan 1-3 pour se retrouver à proximité composés principaux ; en fait elle fait partie de ce dernier groupe, ce que nous avons vérifié dans les autres plans factoriels que nous avons pas représentés.

Les amas représentés sur les graphes des facteurs sont traités par des régressions linéaires dans les graphes qui suivent (Expédition Graphe1 au graphe9).

Chapitre 4

ETUDE DES CORRELATIONS DES PARAMETRES RETENUS APRES ANALYSE.

4.1 Régression entre les variables retenues par l'analyse factorielle.

Il nous paru intéressant de confirmer les résultats de l'analyse factorielle en composantes principales par des régressions polynomiales croisées deux par deux entre les variables retenues lors de cette analyse.

Ces croisements vont permettre, d'une part de chiffrer les relations entre les paramètres du ciment dont les taux de corrélation sont significatifs et éliminer les relations dont le taux de corrélation ne permet pas de confirmer d'une manière évidente la liaison au sens statistique.

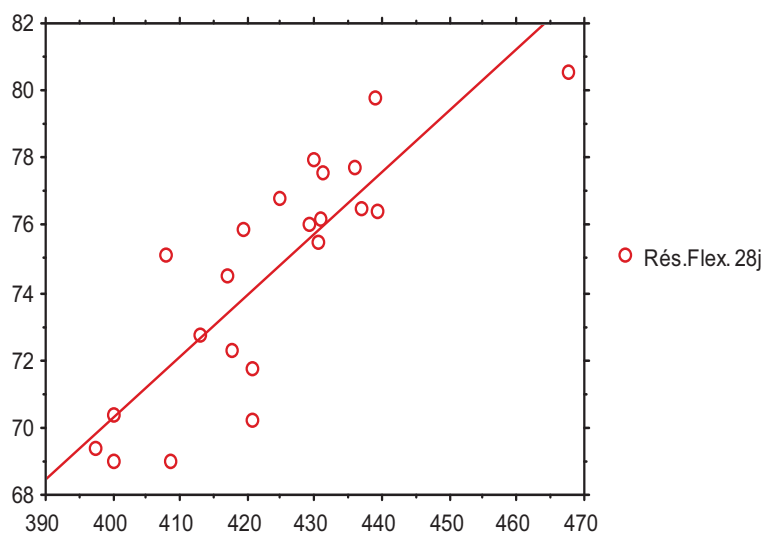
Il est à remarquer que nous avons, tout de même, retenu certaines corrélations avec un faible taux car l'allure de la répartition du nuage de points permet de présupposer une relation si certains points aberrants sont éliminés ou lorsqu'une corrélation existe dans une série de mesures et non dans la série équivalente à la sortie du broyeur ou à l'expédition.

Les calculs sur les résidus de la régression sont menés parallèlement afin de confirmer le bien-fondé du choix de la régression .

Comme nous l'avons expliqué précédemment, nous nous sommes limités à des régressions polynomiales qui englobent , d'une manière approchée, les régressions logarithmiques et exponentielles ; le régression linéaire se passent de commentaires car elle n'est qu'un cas particulier la régression polynomiale.

Nous nous sommes limités au second degré car les degrés supérieurs n'ont pas augmenté le taux de corrélation d'une manière significative.

Broyeur Groupe1



Régression Simple X 1: Rés.Comp.28j Y 1: Rés.Flex. 28j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
22	,846	,716	,702	1,904

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	182,78	182,78	50,438
RESIDUEL	20	72,478	3,624	p = ,0001
TOTAL	21	255,258		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e ≥ 0 :	e < 0 :	Test de DW :
103,731	12	10	1,431

Note : 2 cas supprimés avec val. manquantes.

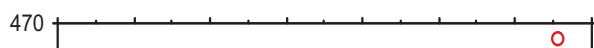
Régression Simple X 1: Rés.Comp.28j Y 1: Rés.Flex. 28j

Coefficient de régression

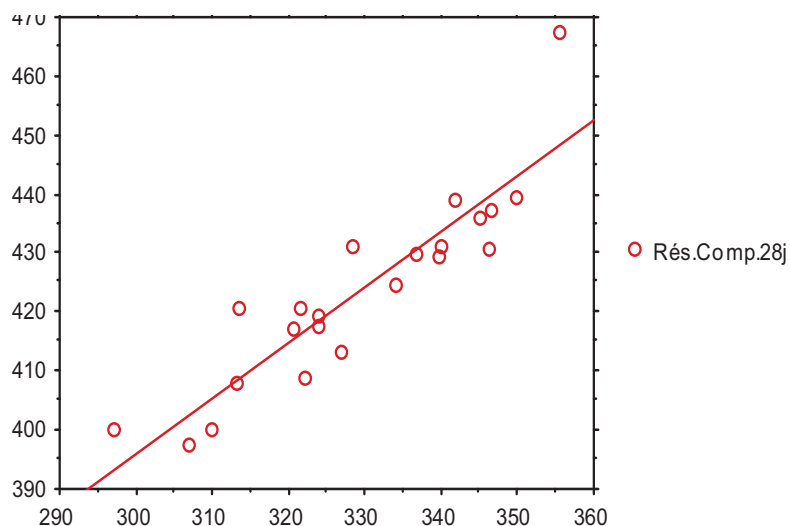
Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	-2,858				
PENTE	,183	,026	,846	7,102	,0001

Intervalle de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	73,752	75,445	73,899	75,299
PENTE	,129	,237	,138	,227



Broyeur Groupe1



Régression Simple X Rés.Comp.7j Y Rés.Comp.28j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
22	,904	,818	,809	7,054

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	4470,173	4470,173	89,839
RESIDUEL	20	995,153	49,758	p = ,0001
TOTAL	21	5465,326		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e $\geq$ 0 :	e < 0 :	Test de DW :
848,562	8	14	,853

Note : 2 cas supprimés avec val. manquantes.

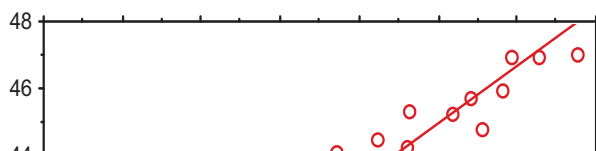
Régression Simple X Rés.Comp.7j Y Rés.Comp.28j

Coefficient de régression

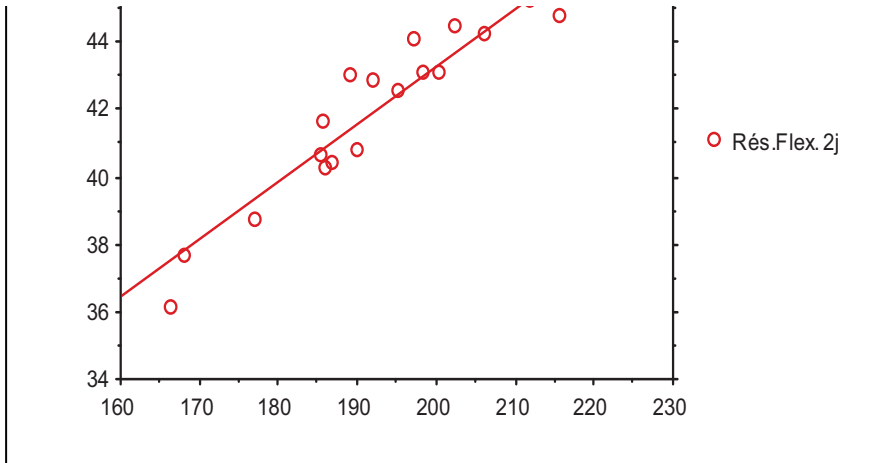
Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	114,3				
PENTE	,939	,099	,904	9,478	,0001

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	420,408	426,683	420,952	426,14
PENTE	,732	1,146	,768	1,11



Broyeur Groupe1



Régression Simple X $\hat{1}$: Rés.Comp. 2j Y $\hat{1}$: Rés.Flex. 2j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
24	,965	,93	,927	,797

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	187,074	187,074	294,236
RESIDUEL	22	13,987	,636	p = ,0001
TOTAL	23	201,061		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e $\geq$ 0 :	e < 0 :	Test de DW :
20,477	10	14	1,464

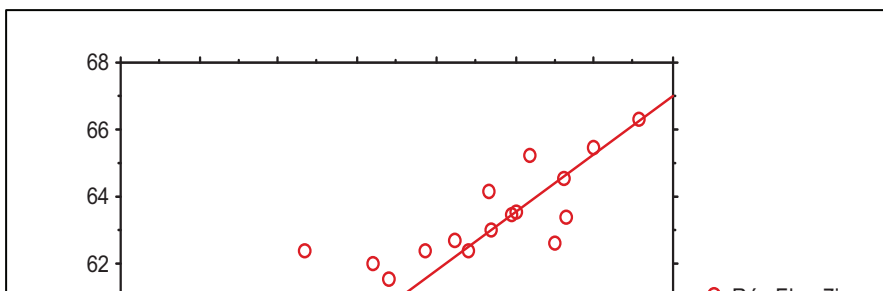
Régression Simple X $\hat{1}$: Rés.Comp. 2j Y $\hat{1}$: Rés.Flex. 2j

Coefficient de régression

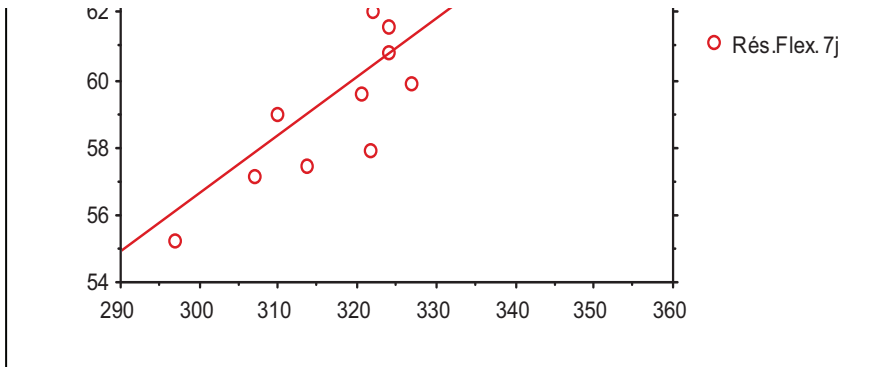
Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	9,051				
PENTE	,171	,01	,965	17,153	,0001

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	42,652	43,328	42,71	43,27
PENTE	,15	,192	,154	,188



Broyeur Groupe1



Régression Simple X 1: Rés.Comp.7j Y 1: Rés.Flex. 7j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
24	,897	,804	,795	1,294

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	151,346	151,346	90,327
RESIDUEL	22	36,862	1,676	p = ,0001
TOTAL	23	188,207		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e ≥ 0 :	e < 0 :	Test de DW :
53,025	13	11	1,438

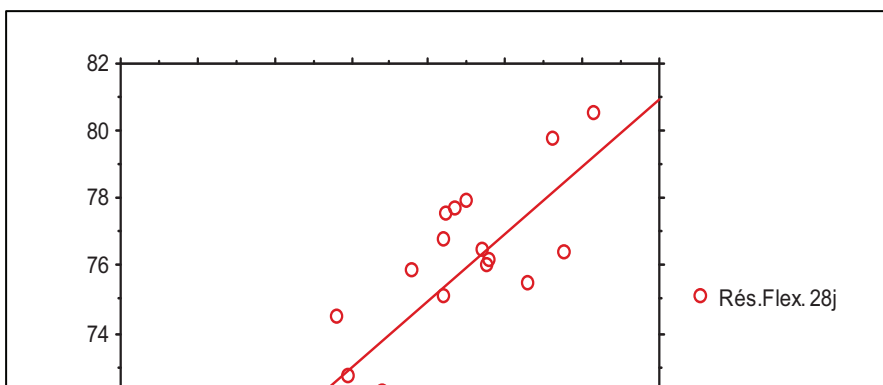
Régression Simple X 1: Rés.Comp.7j Y 1: Rés.Flex. 7j

Coefficient de régression

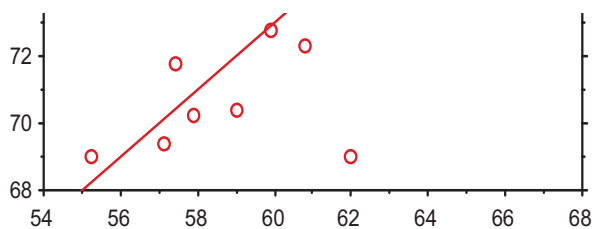
Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	5,116				
PENTE	,172	,018	,897	9,504	,0001

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	61,222	62,318	61,316	62,224
PENTE	,134	,209	,141	,203



Broyeur Groupe1



Régression Simple X 1: Rés.Flex. 7j Y 1: Rés.Flex. 28j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
22	,836	,699	,684	1,959

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	178,479	178,479	46,491
RESIDUEL	20	76,78	3,839	p = ,0001
TOTAL	21	255,258		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e ≥ 0 :	e < 0 :	Test de DW :
102,48	11	11	1,335

Note : 2 cas supprimés avec val. manquantes.

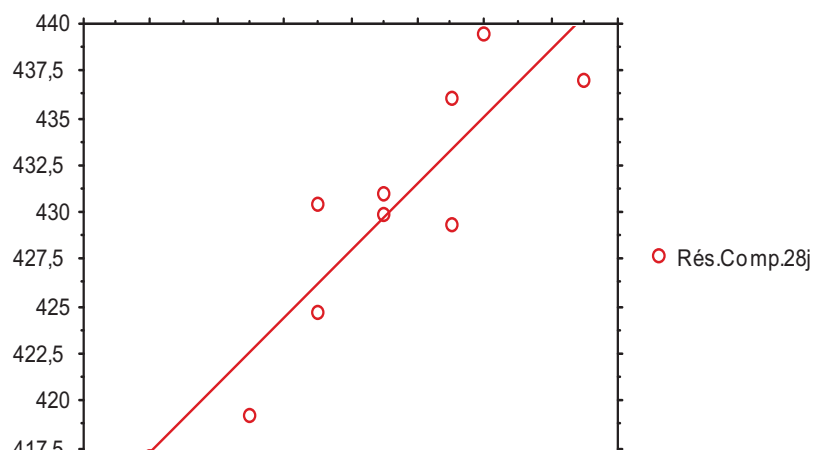
Régression Simple X 1: Rés.Flex. 7j Y 1: Rés.Flex. 28j

Coefficient de régression

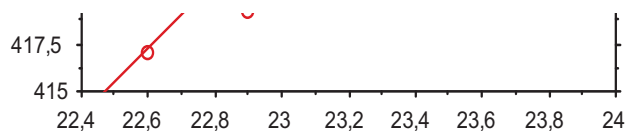
Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	13,396				
PENTE	,993	,146	,836	6,818	,0001

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	73,727	75,47	73,878	75,319
PENTE	,689	1,297	,742	1,245



Broyeur Groupe1



Régression Simple X 1 : % Eau Y 1 : Rés.Comp.28j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
10	,906	,82	,798	3,297

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	396,194	396,194	36,448
RESIDUEL	8	86,96	10,87	p = ,0003
TOTAL	9	483,154		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e // 0 :	e < 0 :	Test de DW :
264,874	5	5	3,046

Note : 14 cas supprimés avec val. manquantes.

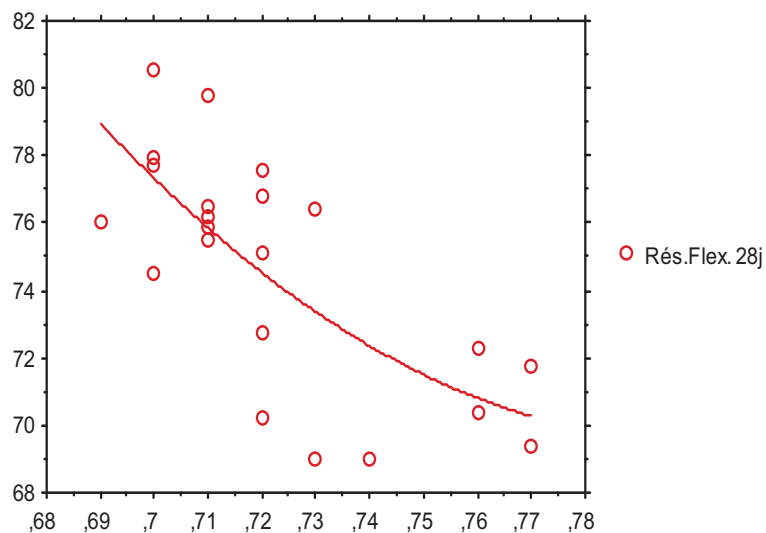
Régression Simple X 1 : % Eau Y 1 : Rés.Comp.28j

Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	15,934				
PENTE	17,761	2,942	,906	6,037	,0003

Intervalle de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	426,997	431,807	427,463	431,341
PENTE	10,976	24,545	12,29	23,232



Broyeur Groupe1

,68 ,69 ,7 ,71 ,72 ,73 ,74 ,75 ,76 ,77 ,78

Régression Polynomiale X 1 : %K2O Y 1 : Rés.Flex. 28j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
22	,714	,51	,458	2,567

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	2	130,088	65,044	9,873
RESIDUEL	19	125,17	6,588	p = ,0011
TOTAL	21	255,258		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)]:	e // 0:	e < 0:	Test de DW :
186,065	13	9	1,486

Note : 2 cas supprimés avec val. manquantes.

Régression Polynomiale X 1 : %K2O Y 1 : Rés.Flex. 28j

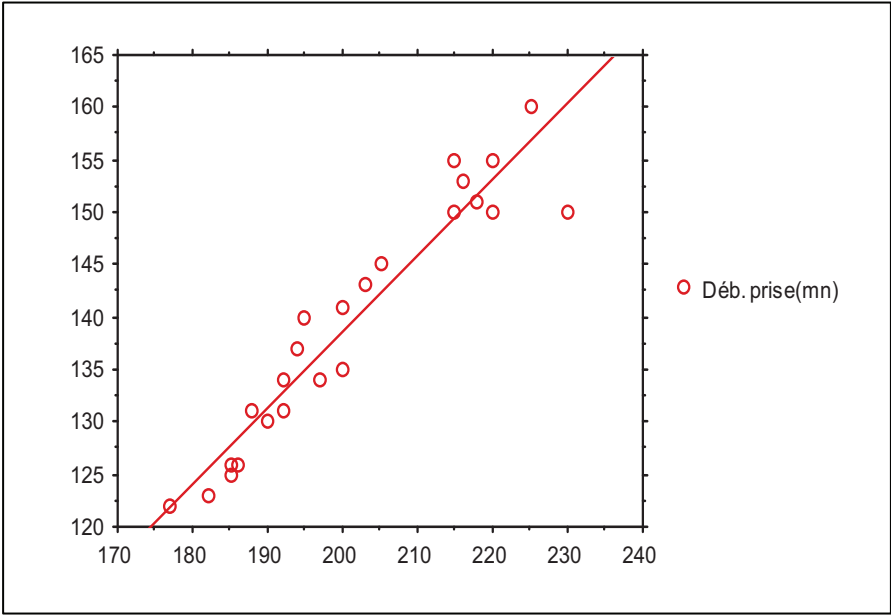
Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	566,26				
x	-1242,13	1581,821	-8,387	,785	,442
x ²	776,608	1079,562	7,683	,719	,4807

Régression Polynomiale X 1 : %K2O Y 1 : Rés.Flex. 28j

Intervalles de confiance et F partiel

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :	F Partiel :
CONSTANTE					
x	-4553,276	2069,017	-3977,576	1493,317	,617
x ²	-1483,184	3036,4	-1090,28	2643,496	,517



Régression Simple X ₁ : Fin prise (mn) Y ₁ : Déb. prise(mn)				
Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
24	,955	,912	,908	3,508

Broyeur Groupe1

24	,955	,912	,908	3,508
----	------	------	------	-------

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	2795,208	2795,208	227,127
RESIDUEL	22	270,75	12,307	p = ,0001
TOTAL	23	3065,958		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)]:	e ≥ 0:	e < 0:	Test de DW:
383,109	13	11	1,415

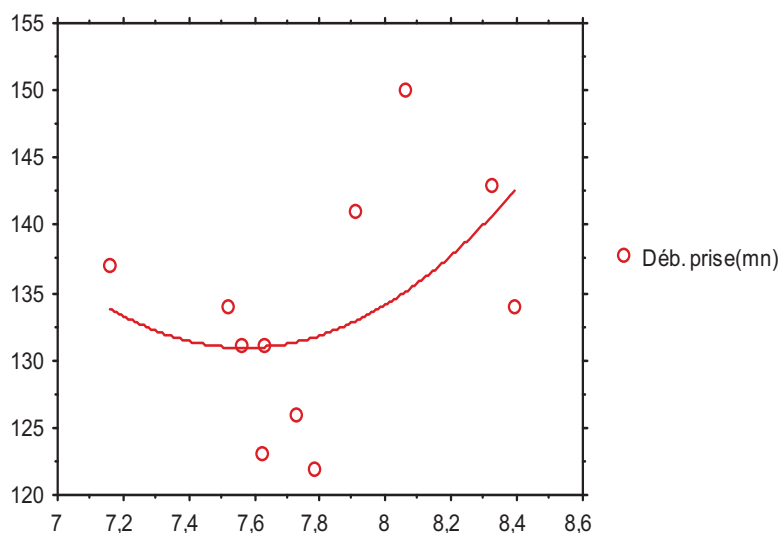
Régression Simple X ₁ : Fin prise (mn) Y ₁ : Déb. prise(mn)

Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	-6,797				
PENTE	,727	,048	,955	15,071	,0001

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	137,973	140,944	138,229	140,688
PENTE	,627	,827	,644	,81



Régression Polynomiale X ₁ : P.F. 1200°C Y ₁ : Déb. prise(mn)

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
11	,478	,229	,036	8,455

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
--------	-------	-----------------	---------------	----------

Broyeur Groupe1

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	2	169,673	84,836	1,187
RESIDUEL	8	571,963	71,495	p = ,3538
TOTAL	10	741,636		

Résidus			
SC[e(i)-e(i-1)]:	e ≥ 0:	e < 0:	Test de DW :
656,713	7	4	1,148

Note : 13 cas supprimés avec val. manquantes.

Régression Polynomiale X 1 : P.F. 1200°C Y 1 : Déb. prise(mn)

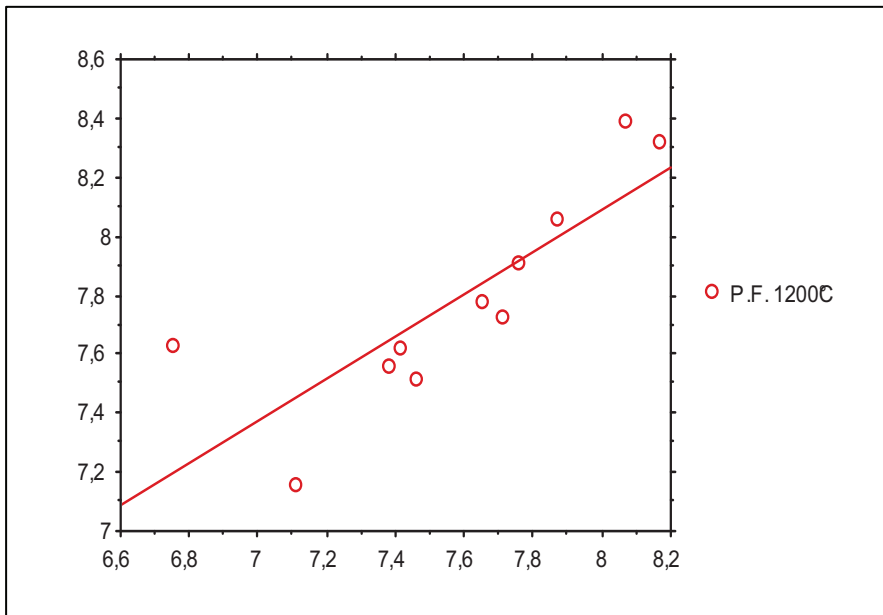
Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	1123,347				
x	-262,224	283,393	-11,017	,925	,3819
x ²	17,322	18,098	11,396	,957	,3665

Régression Polynomiale X 1 : P.F. 1200°C Y 1 : Déb. prise(mn)

Intervalles de confiance et F partiel

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :	F Partiel :
CONSTANTE					
x	-915,81	391,362	-789,264	264,815	,856
x ²	-24,417	59,06	-16,336	50,979	,916



Régression Simple X 1: P.F. 1000°C Y 1: P.F. 1200°C

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
11	,823	,677	,641	,217

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	,886	,886	18,846
RESIDUEL	9	,423	,047	p = ,0019
TOTAL	10	1,309		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)]:	e 0:	e < 0:	Test de DW:
------------------	---------	--------	-------------

Broyeur Groupe1

SC[e(i)-e(i-1)]:	e // 0:	e < 0:	Test de DW :
,822	4	7	1,943

Note : 13 cas supprimés avec val. manquantes.

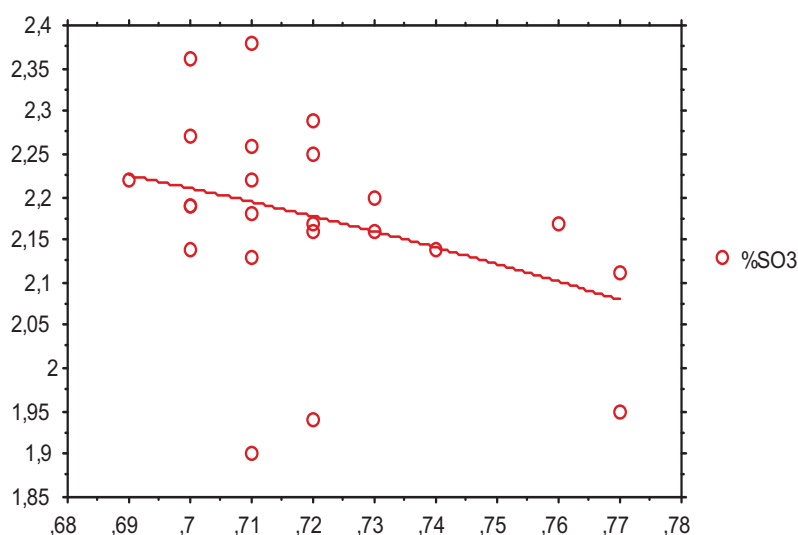
Régression Simple X $\text{P.F. } 1000^{\circ}\text{C}$ Y $\text{P.F. } 1200^{\circ}\text{C}$

Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	2,351				
PENTE	,718	,165	,823	4,341	,0019

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	7,641	7,937	7,669	7,909
PENTE	,344	1,092	,415	1,021



Régression Polynomiale X $\text{\%K2O}$ Y $\text{\%SO3}$

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
24	,367	,135	,052	,112

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	2	,041	,021	1,634
RESIDUEL	21	,266	,013	p = ,219
TOTAL	23	,307		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)]:	e // 0:	e < 0:	Test de DW :
,429	12	12	1,613

Régression Polynomiale X 1 : %K2O Y 1 : %SO3

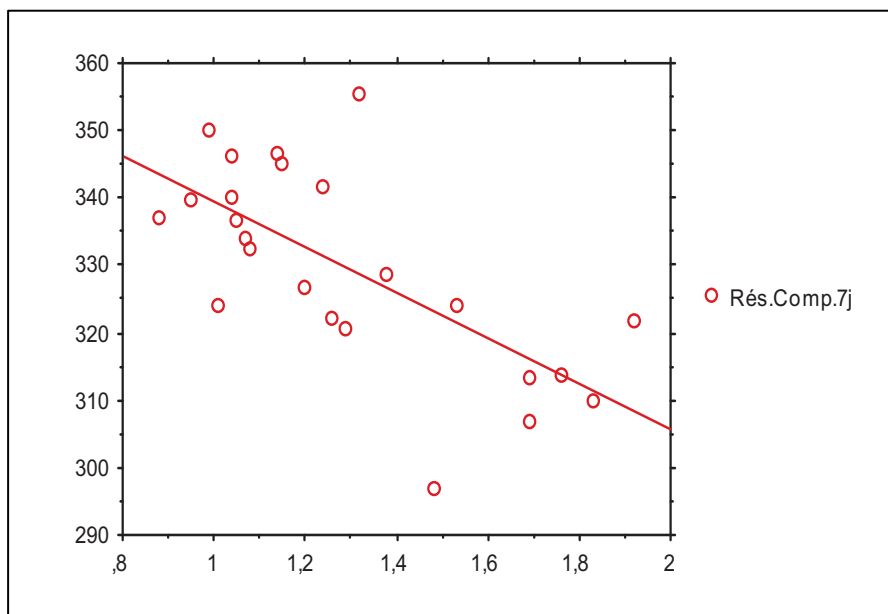
Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	1,076				
x	4,783	68,146	,956	,07	,9447
x ²	-4,518	46,529	-1,322	,097	,9236

Régression Polynomiale X 1 : %K2O Y 1 : %SO3

Intervalles de confiance et F partiel

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :	F Partiel :
CONSTANTE					
x	-136,949	146,515	-112,49	122,055	,005
x ²	-101,29	92,254	-84,59	75,553	,009



Régression Simple X 1 : %Rés. insol. Y 1 : Rés.Comp.7j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
24	,685	,469	,445	11,119

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	2405,823	2405,823	19,459
RESIDUEL	22	2720,047	123,638	p = ,0002
TOTAL	23	5125,87		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)]:	e // 0:	e < 0:	Test de DW :
4111,098	10	14	1,511

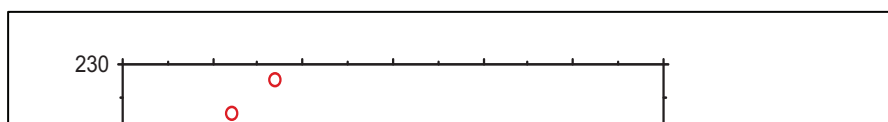
Régression Simple X 1 : %Rés. insol. Y 1 : Rés.Comp.7j

Coefficient de régression

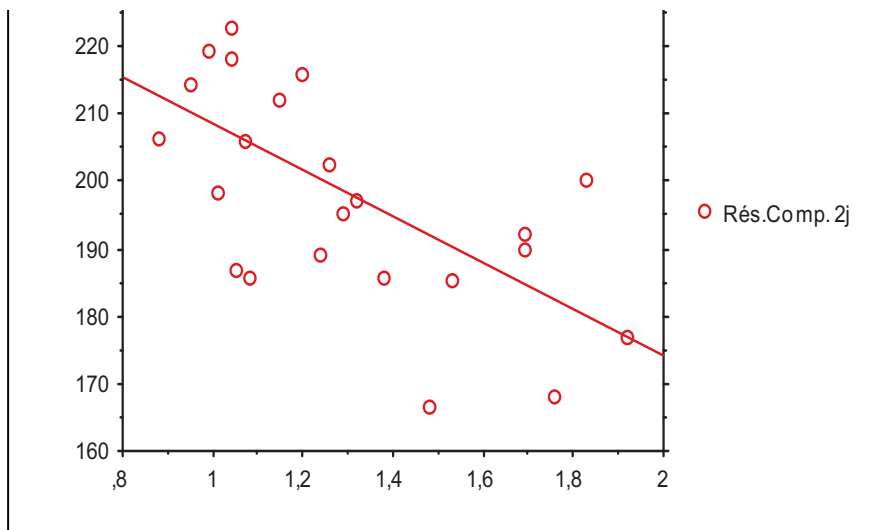
Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	373,281				
PENTE	-33,744	7,65	-,685	4,411	,0002

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	325,002	334,417	325,811	333,607
PENTE	-49,61	-17,878	-46,881	-20,607



Broyeur Groupe2



Régression Simple X $\% \text{Rés. insol.}$ Y Rés.Comp. 2j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
24	,625	,391	,363	13,302

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	2498,854	2498,854	14,121
RESIDUEL	22	3892,989	176,954	p = ,0011
TOTAL	23	6391,843		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)]:	e 0:	e < 0:	Test de DW :
3434,734	13	11	,882

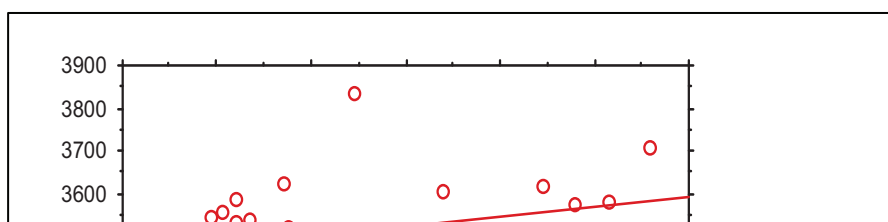
Régression Simple X $\% \text{Rés. insol.}$ Y Rés.Comp. 2j

Coefficient de régression

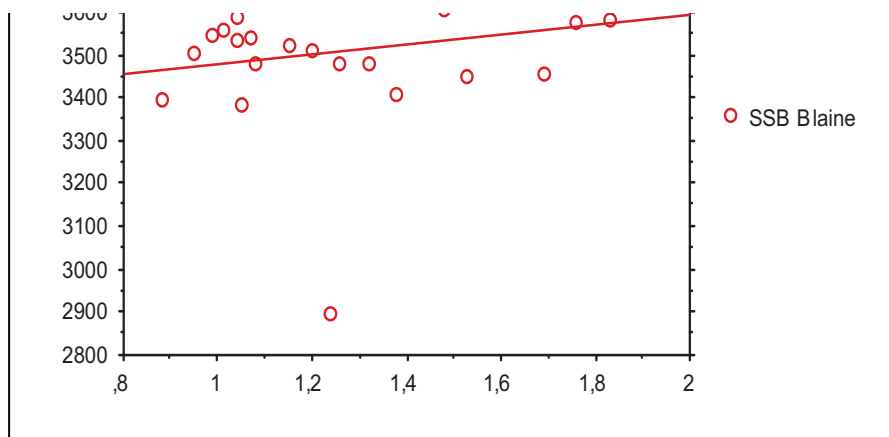
Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	242,789				
PENTE	-34,39	9,152	,625	3,758	,0011

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	192,751	204,015	193,72	203,046
PENTE	-53,371	-15,409	-50,106	-18,674



Broyeur Groupe2



Régression Simple X $\% \text{Rés. insol.}$ Y SSB Blaine

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
24	,219	,048	,005	163,96

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	29795,572	29795,572	1,108
RESIDUEL	22	591421,053	26882,775	p = ,3039
TOTAL	23	621216,625		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e $\geq$ 0 :	e < 0 :	Test de DW :
750186,435	15	9	1,268

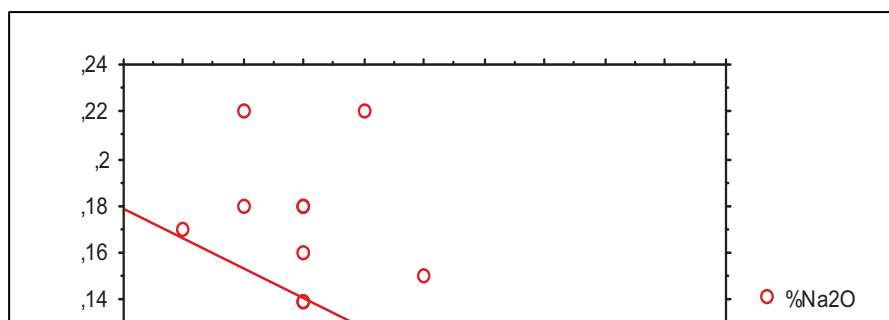
Régression Simple X $\% \text{Rés. insol.}$ Y SSB Blaine

Coefficient de régression

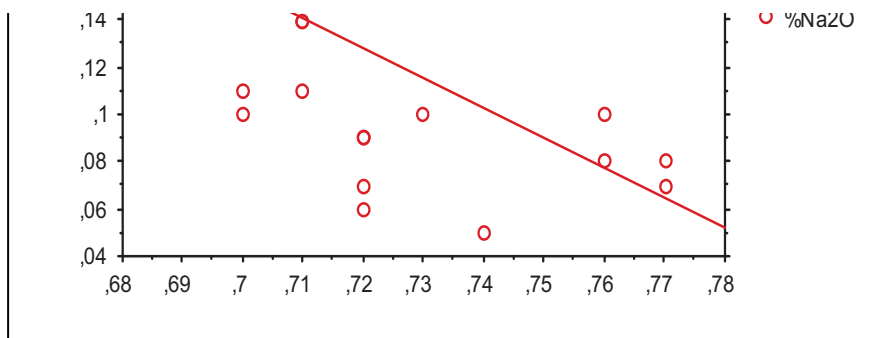
Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	3357,787				
PENTE	118,752	112,798	,219	1,053	,3039

Intervalle de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	3441,709	3580,541	3453,65	3568,6
PENTE	-115,202	352,705	-74,957	312,461



Broyeur Groupe2



Régression Simple X 1 : %K₂O Y 1 : %Na₂O

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
24	,579	,335	,305	,042

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	,02	,02	11,078
RESIDUEL	22	,039	,002	p = ,003
TOTAL	23	,059		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e ≥ 0 :	e < 0 :	Test de DW :
,057	13	11	1,459

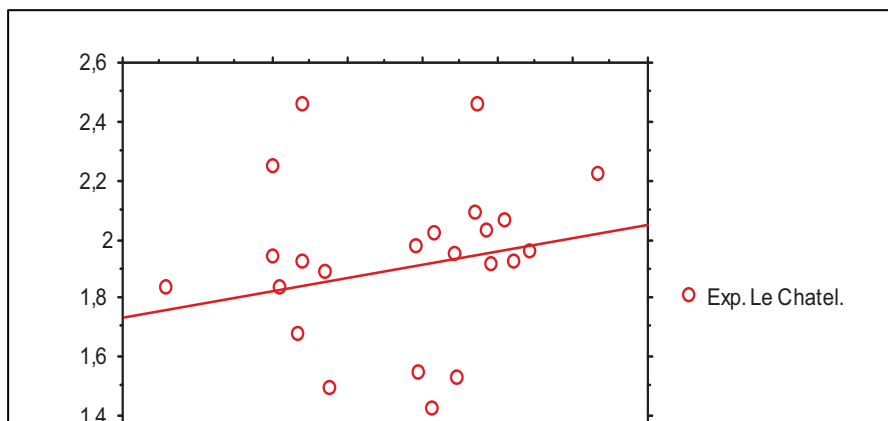
Régression Simple X 1 : %K₂O Y 1 : %Na₂O

Coefficient de régression

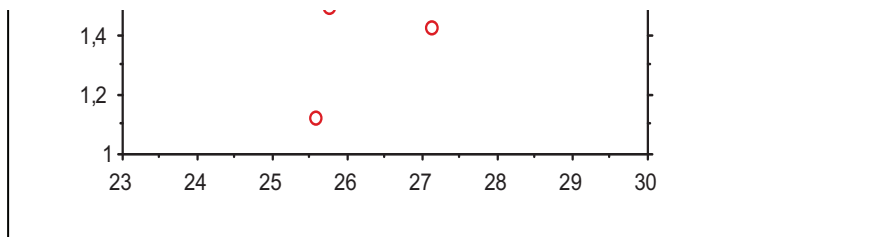
Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	1,043				
PENTE	-1,271	,382	-,579	3,328	,003

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	,108	,144	,111	,141
PENTE	-2,063	-,479	-1,927	-,615



Broyeur Groupe2



Régression Simple X 1 : Résidu 45m Y 1 : Exp. Le Chatel.

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
24	,206	,042	-,001	,314

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	,096	,096	,975
RESIDUEL	22	2,173	,099	p = ,3342
TOTAL	23	2,269		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e ≥ 0 :	e < 0 :	Test de DW :
3,801	15	9	1,749

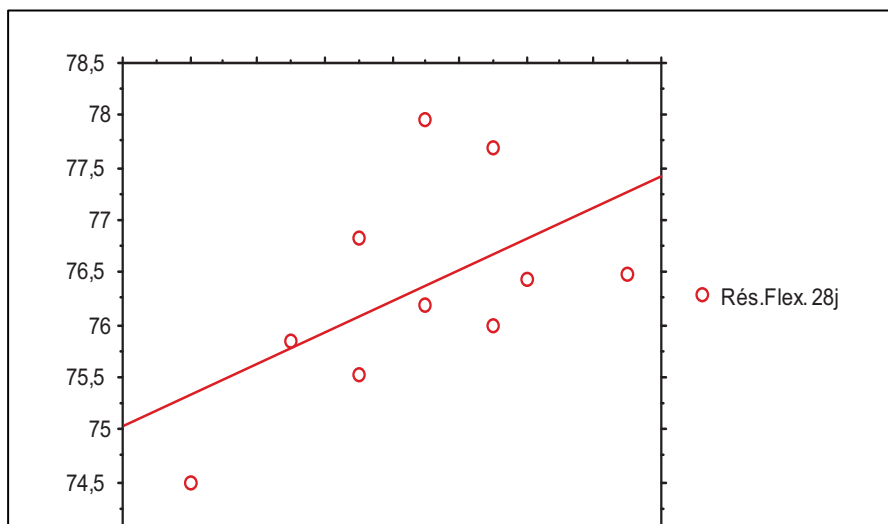
Régression Simple X 1 : Résidu 45m Y 1 : Exp. Le Chatel.

Coefficient de régression

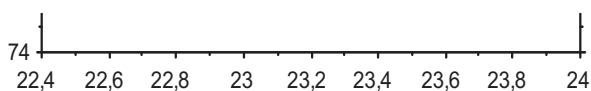
Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	,692				
PENTE	,045	,046	,206	,987	,3342

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	1,767	2,033	1,789	2,01
PENTE	-,05	,14	-,033	,124



Broyeur Groupe2



Régression Simple X 1 : % Eau Y 1 : Rés.Flex. 28j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
10	,55	,302	,215	,892

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	2,761	2,761	3,47
RESIDUEL	8	6,366	,796	p = ,0995
TOTAL	9	9,127		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e // 0 :	e < 0 :	Test de DW :
10,001	4	6	1,571

Note : 14 cas supprimés avec val. manquantes.

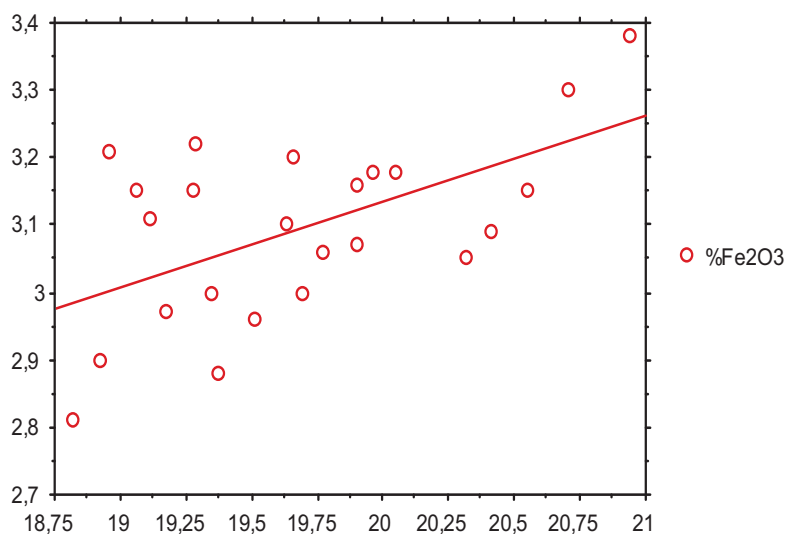
Régression Simple X 1 : % Eau Y 1 : Rés.Flex. 28j

Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	41,83				
PENTE	1,483	,796	,55	1,863	,0995

Intervalle de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	75,695	76,997	75,821	76,871
PENTE	-,353	3,318	,002	2,963



Régression Simple X 1 : %SiO2 Y 1 : %Fe2O3

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
24	,564	,318	,287	,113

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	,131	,131	10,239
RESIDUEL	22	,281	,013	p = ,0041
TOTAL	23	,412		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e // 0 :	e < 0 :	Test de DW :
,368	12	12	1,307

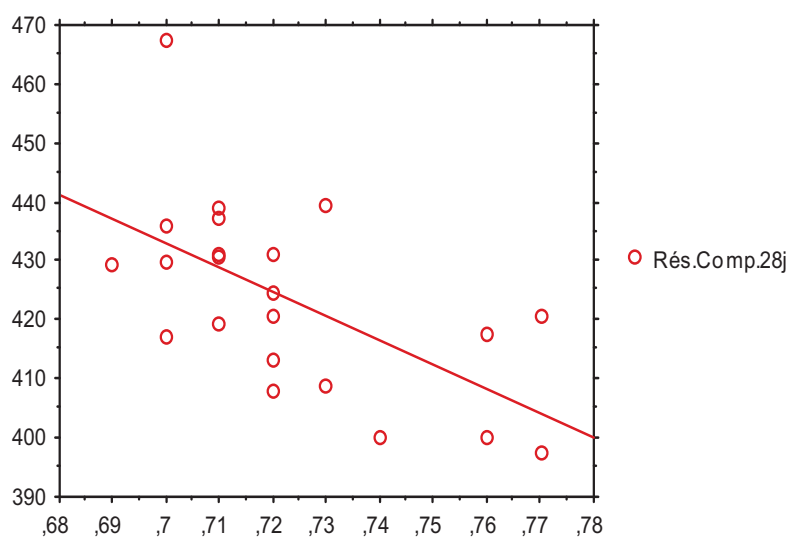
Régression Simple X 1 : %SiO2 Y 1 : %Fe2O3

Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	,58				
PENTE	,128	,04	,564	3,2	,0041

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	3,047	3,143	3,055	3,135
PENTE	,045	,211	,059	,196

**Régression Simple X 1 : %K2O Y 1 : Rés.Comp.28j**

Broyeur Groupe2

Régression Simple X 1 : %K2O Y 1 : Rés.Comp.28j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
22	,597	,356	,324	13,262

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	1947,837	1947,837	11,075
RESIDUEL	20	3517,489	175,874	p = ,0034
TOTAL	21	5465,326		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e // 0 :	e < 0 :	Test de DW :
6317,59	11	11	1,796

Note : 2 cas supprimés avec val. manquantes.

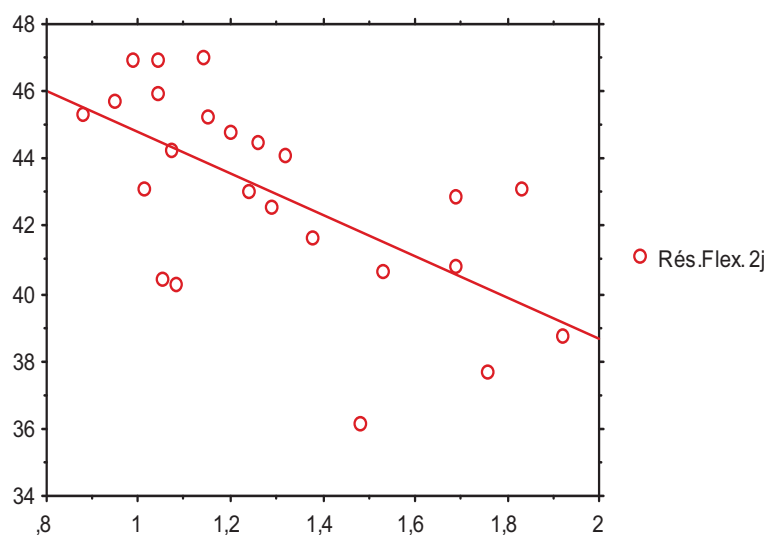
Régression Simple X 1 : %K2O Y 1 : Rés.Comp.28j

Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	719,24				
PENTE	-409,136	122,94	-,597	3,328	,0034

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	417,647	429,444	418,669	428,423
PENTE	-665,612	-152,66	-621,193	-197,079



Régression Simple X 1 : %Rés. insol. Y 1 : Rés.Flex. 2j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
24	,63	,397	,37	2,347

Broyeur Groupe2

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	79,921	79,921	14,514
RESIDUEL	22	121,14	5,506	p = ,001
TOTAL	23	201,061		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)]:	e // 0:	e < 0:	Test de DW:
124,867	12	12	1,031

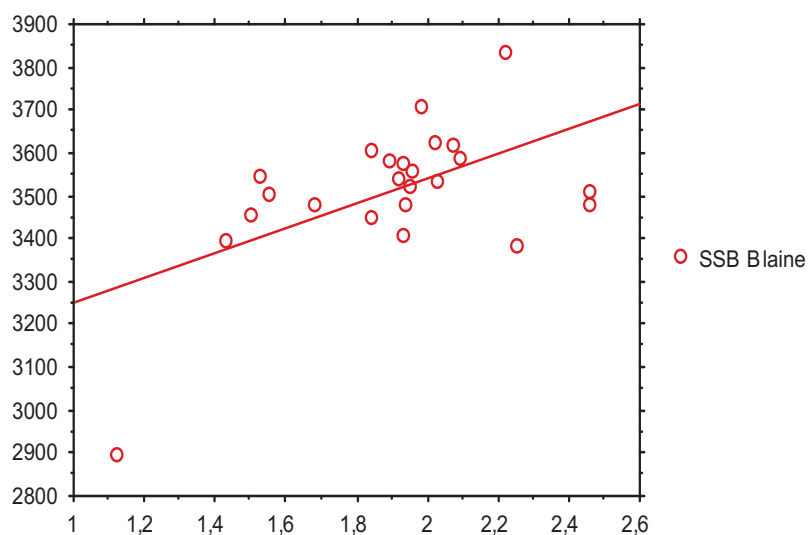
Régression Simple X ₁: %Rés. insol. Y ₁: Rés.Flex. 2j

Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	50,932				
PENTE	-6,15	1,614	-,63	3,81	,001

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	41,997	43,983	42,167	43,813
PENTE	-9,499	-2,802	-8,923	-3,378



Régression Simple X ₁: Exp. Le Chatel. Y ₁: SSB Blaine

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
24	,555	,308	,276	139,821

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	191117,273	191117,273	9,776

Broyeur Groupe2

REGRESSION	1	191117,273	191117,273	9,776
RESIDUEL	22	430099,352	19549,971	p = ,0049
TOTAL	23	621216,625		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)]:	e ≥ 0:	e < 0:	Test de DW:
505672,052	15	9	1,176

Régression Simple X ₁ : Exp. Le Chatel. Y ₁ : SSB Blaine

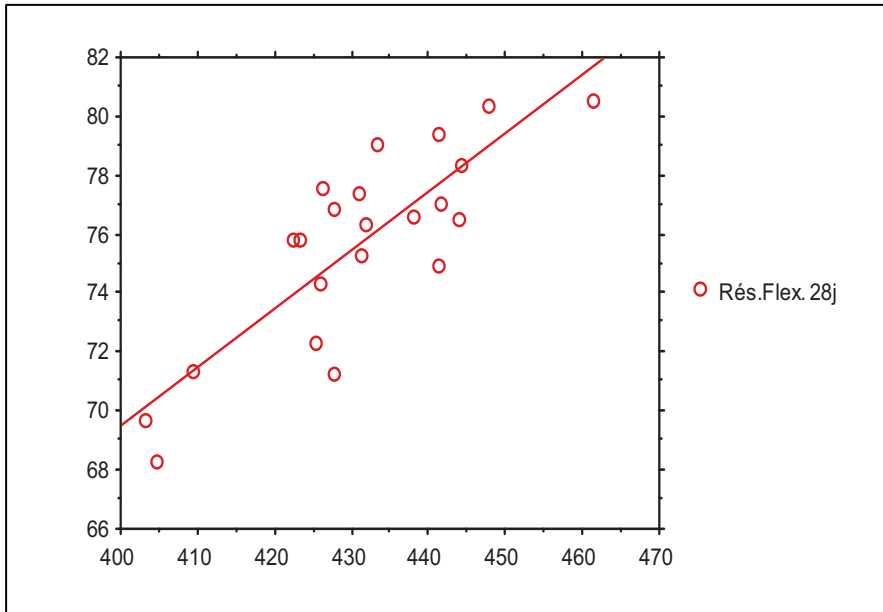
Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	2959,833				
PENTE	290,217	92,821	,555	3,127	,0049

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	3451,929	3570,321	3462,111	3560,139
PENTE	97,698	482,737	130,815	449,62

Expédition Groupe1



Régression Simple X 1: Rés.Comp.28j Y 1: Rés.Flex. 28j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
22	,834	,696	,681	1,879

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	161,456	161,456	45,753
RESIDUEL	20	70,577	3,529	p = ,0001
TOTAL	21	232,033		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e ≥ 0 :	e < 0 :	Test de DW :
104,38	10	12	1,479

Note : 2 cas supprimés avec val. manquantes.

Régression Simple X 1: Rés.Comp.28j Y 1: Rés.Flex. 28j

Coefficient de régression

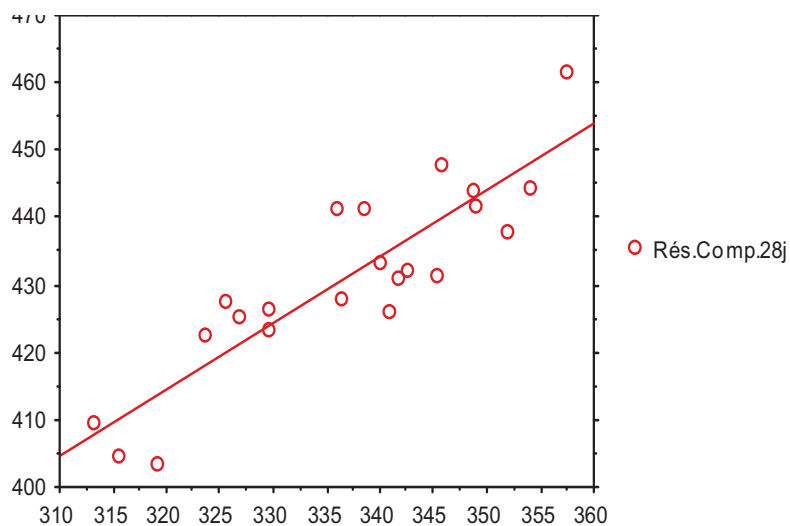
Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	-10,039				
PENTE	,199	,029	,834	6,764	,0001

Intervalle de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	74,82	76,491	74,965	76,347
PENTE	,137	,26	,148	,249

470

Expédition Groupe1



Régression Simple X 1 : Rés.Comp.7j Y 1 : Rés.Comp.28j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
22	,885	,783	,773	6,653

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	3201,093	3201,093	72,323
RESIDUEL	20	885,218	44,261	p = ,0001
TOTAL	21	4086,31		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e 0 :	e < 0 :	Test de DW :
1232,106	10	12	1,392

Note : 2 cas supprimés avec val. manquantes.

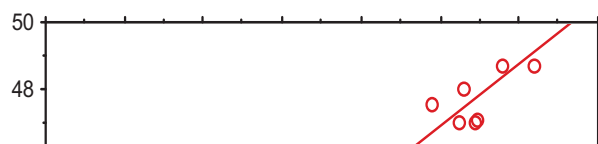
Régression Simple X 1 : Rés.Comp.7j Y 1 : Rés.Comp.28j

Coefficient de régression

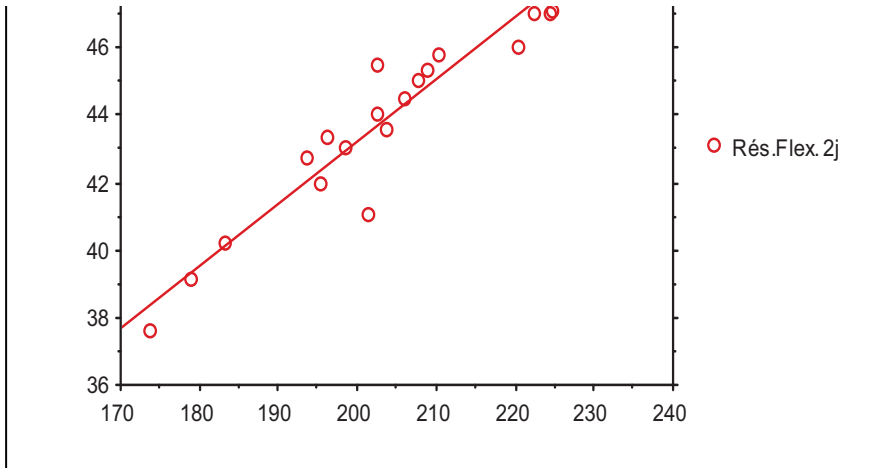
Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	99,669				
PENTE	,984	,116	,885	8,504	,0001

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	428,156	434,074	428,668	433,562
PENTE	,743	1,225	,784	1,183



Expédition Groupe1



Régression Simple X $\hat{1}$: Rés.Comp. 2j Y $\hat{1}$: Rés.Flex. 2j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
23	,962	,925	,921	,855

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	187,969	187,969	257,311
RESIDUEL	21	15,341	,731	p = ,0001
TOTAL	22	203,31		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e $\geq$ 0 :	e < 0 :	Test de DW :
35,541	13	10	2,317

Note : 1 cas supprimé avec val. manquantes.

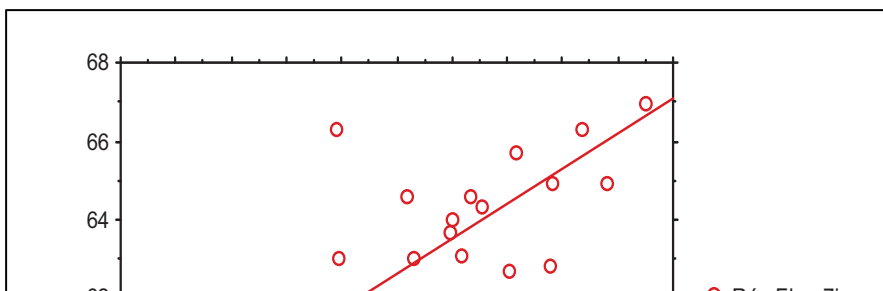
Régression Simple X $\hat{1}$: Rés.Comp. 2j Y $\hat{1}$: Rés.Flex. 2j

Coefficient de régression

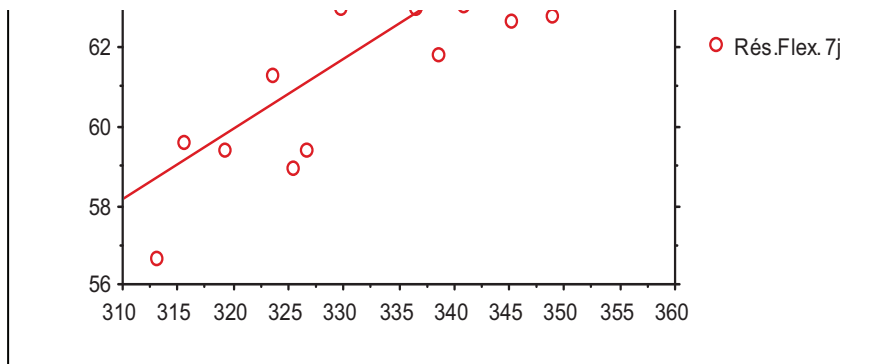
Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	6,41				
PENTE	,184	,011	,962	16,041	,0001

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	44,095	44,836	44,159	44,772
PENTE	,16	,208	,164	,204



Expédition Groupe1



Régression Simple X 1: Rés.Comp.7j Y 1: Rés.Flex. 7j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
23	,815	,664	,648	1,595

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	105,697	105,697	41,573
RESIDUEL	21	53,392	2,542	p = ,0001
TOTAL	22	159,089		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e ≥ 0 :	e < 0 :	Test de DW :
85,705	13	10	1,605

Note : 1 cas supprimé avec val. manquantes.

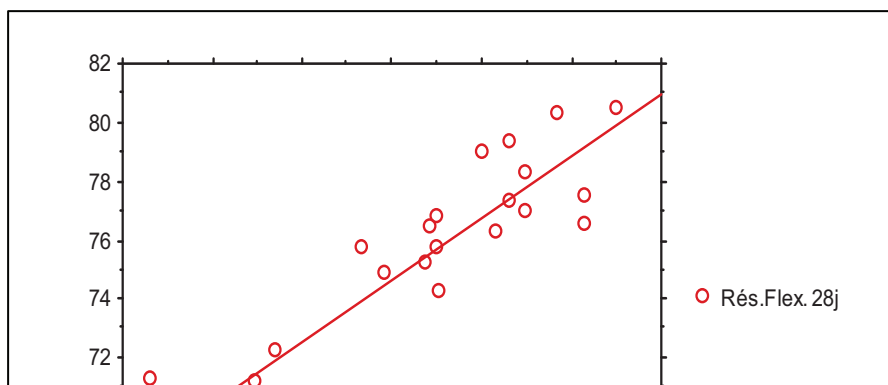
Régression Simple X 1: Rés.Comp.7j Y 1: Rés.Flex. 7j

Coefficient de régression

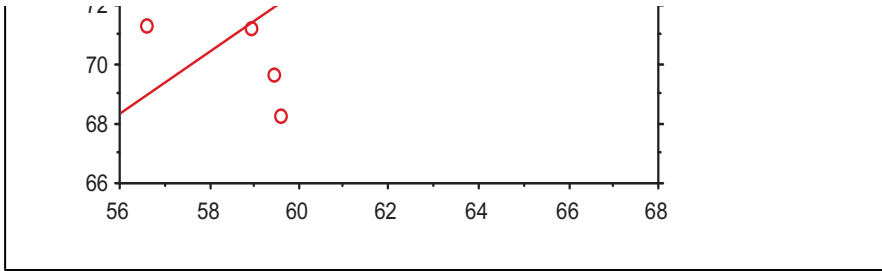
Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	2,79				
PENTE	,179	,028	,815	6,448	,0001

Intervalle de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	62,271	63,654	62,39	63,535
PENTE	,121	,236	,131	,226



Expédition Groupe1



Régression Simple X 1: Rés.Flex. 7j Y 1: Rés.Flex. 28j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
22	,866	,75	,737	1,704

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	173,989	173,989	59,951
RESIDUEL	20	58,043	2,902	p = ,0001
TOTAL	21	232,033		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e ≥ 0 :	e < 0 :	Test de DW :
88,779	12	10	1,53

Note : 2 cas supprimés avec val. manquantes.

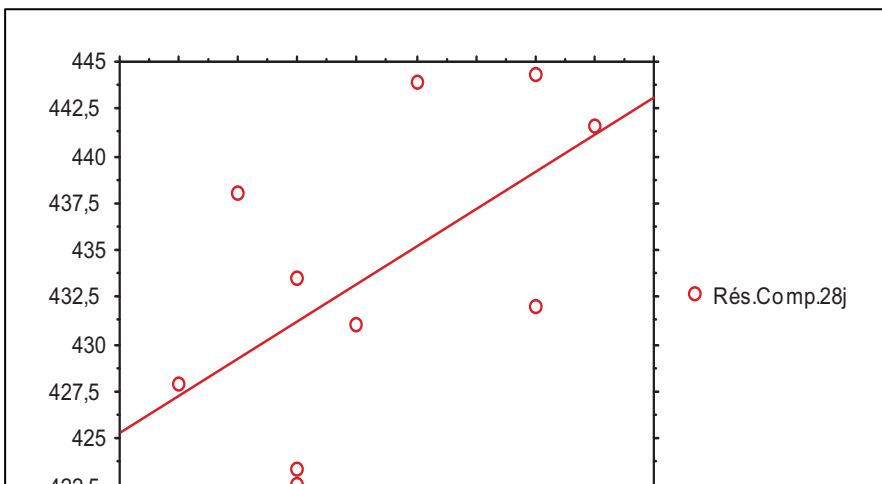
Régression Simple X 1: Rés.Flex. 7j Y 1: Rés.Flex. 28j

Coefficient de régression

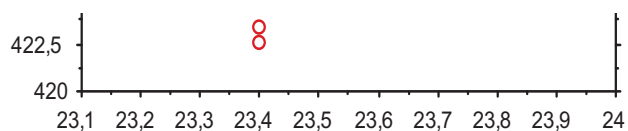
Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	9,728				
PENTE	1,048	,135	,866	7,743	,0001

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	74,898	76,414	75,029	76,282
PENTE	,765	1,33	,814	1,281



Expédition Groupe1



Régression Simple X 1 : % Eau Y 1 : Rés.Comp.28j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
10	,583	,34	,258	6,863

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	194,413	194,413	4,127
RESIDUEL	8	376,824	47,103	p = ,0767
TOTAL	9	571,237		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e // 0 :	e < 0 :	Test de DW :
1068,526	6	4	2,836

Note : 14 cas supprimés avec val. manquantes.

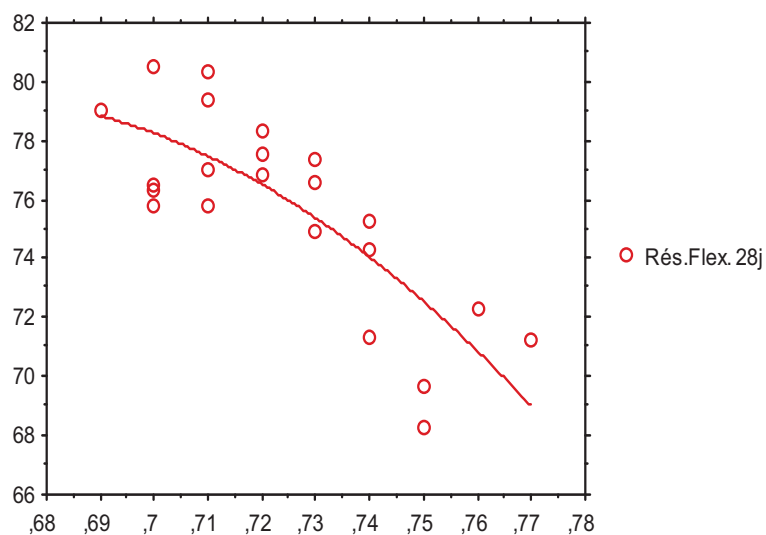
Régression Simple X 1 : % Eau Y 1 : Rés.Comp.28j

Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	-29,702				
PENTE	19,699	9,696	,583	2,032	,0767

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	428,811	438,821	429,78	437,852
PENTE	-2,663	42,061	1,666	37,732



Expédition Groupe1

,68 ,69 ,7 ,71 ,72 ,73 ,74 ,75 ,76 ,77 ,78

Régression Polynomiale X 1 : %K2O Y 1 : Rés.Flex. 28j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
22	,794	,63	,591	2,125

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	2	146,221	73,111	16,188
RESIDUEL	19	85,811	4,516	p = ,0001
TOTAL	21	232,033		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)]:	e // 0:	e < 0:	Test de DW :
156,922	13	9	1,829

Note : 2 cas supprimés avec val. manquantes.

Régression Polynomiale X 1 : %K2O Y 1 : Rés.Flex. 28j

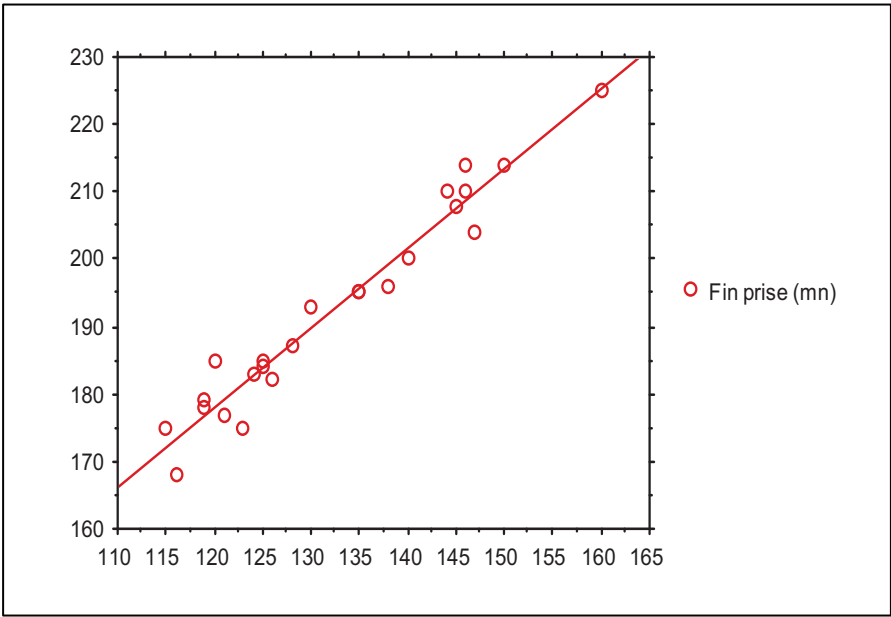
Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	-314,471				
x	1190,802	1402,73	7,791	,849	,4065
x ²	-899,692	962,906	-8,575	,934	,3618

Régression Polynomiale X 1 : %K2O Y 1 : Rés.Flex. 28j

Intervalles de confiance et F partiel

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :	F Partiel :
CONSTANTE					
x	-1745,463	4127,067	-1234,943	3616,546	,721
x ²	-2915,294	1115,91	-2564,847	765,463	,873



Régression Polynomiale X 1 : Déb. prise(mn) Y 1 : Fin prise (mn)				
Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
24	.976	.953	.948	3.464

Expédition Groupe1

24	,976	,953	,948	3,464
----	------	------	------	-------

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	2	5055,886	2527,943	210,706
RESIDUEL	21	251,947	11,997	p = ,0001
TOTAL	23	5307,833		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)]:	e // 0:	e < 0:	Test de DW:
586,128	13	11	2,326

Régression Simple X ₁ : Déb. prise(mn) Y ₁ : Fin prise (mn)

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
24	,976	,952	,95	3,389

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	5055,144	5055,144	440,118
RESIDUEL	22	252,689	11,486	p = ,0001
TOTAL	23	5307,833		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)]:	e // 0:	e < 0:	Test de DW:
587,093	13	11	2,323

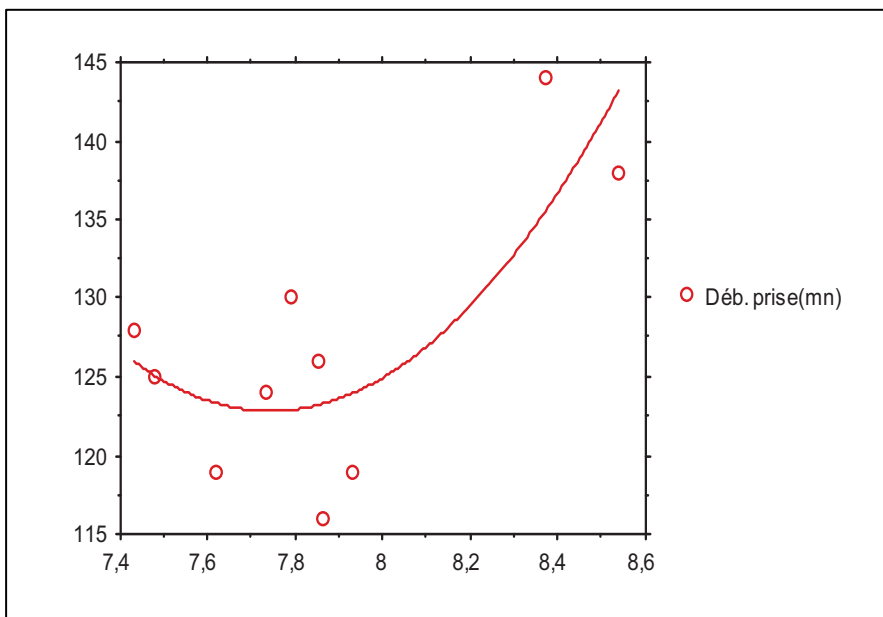
Régression Simple X ₁ : Déb. prise(mn) Y ₁ : Fin prise (mn)

Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	35,712				
PENTE	1,185	,056	,976	20,979	,0001

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	191,148	194,018	191,395	193,771
PENTE	1,068	1,302	1,088	1,282



Régression Polynomiale X φ : P.F. 1200°C Y φ : Déb. prise(mn)

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
10	,787	,619	,51	6,095

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	2	422,835	211,417	5,691
RESIDUEL	7	260,065	37,152	p = ,0341
TOTAL	9	682,9		

Expédition Groupe1

TOTAL	9	682,9		
-------	---	-------	--	--

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)]:	e 0:	e<0:	Test de DW:
415,203	5	5	1,597

Note : 14 cas supprimés avec val. manquantes.

Régression Polynomiale X 1 : P.F. 1200°C Y 1 : Déb. prise(mn)

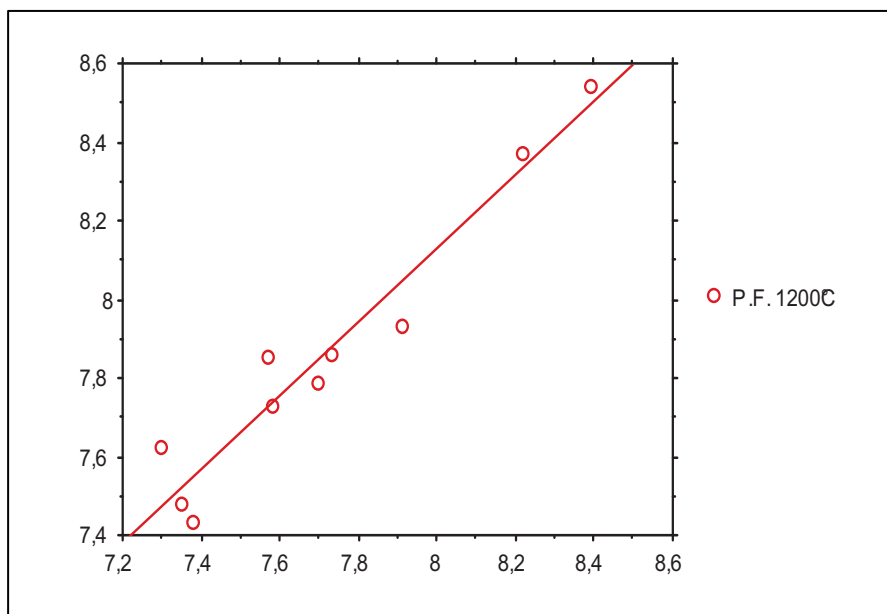
Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	2040,59				
x	-495,384	266,568	-20,206	1,858	,1055
x ²	31,991	16,676	20,859	1,918	,0966

Régression Polynomiale X 1 : P.F. 1200°C Y 1 : Déb. prise(mn)

Intervalle de confiance et F partiel

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :	F Partiel :
CONSTANTE					
x	-1125,798	135,03	-1000,474	9,706	3,454
x ²	-7,447	71,429	,393	63,589	3,68



Régression Simple X 1 : P.F. 1000°C Y 1 : P.F. 1200°C

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
10	,968	,936	,928	,095

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	1,064	1,064	117,302
RESIDUEL	8	,073	,009	p = ,0001
TOTAL	9	1,136		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)]:	e // 0:	e < 0:	Test de DW :
,167	4	6	2,296

Note : 14 cas supprimés avec val. manquantes.

Expédition Groupe1

NOTE : Les cases supprimées avec Var. manquantes.

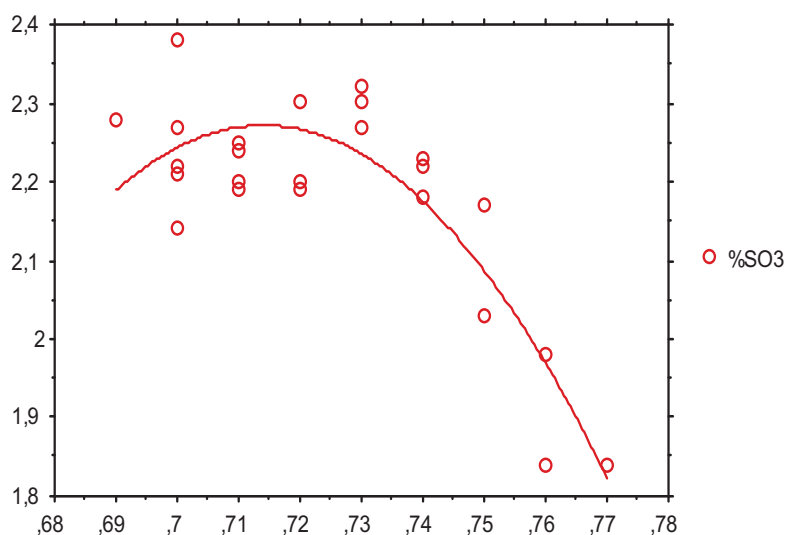
Régression Simple X 1: P.F. 1000°C Y 1: P.F. 1200°C

Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	,616				
PENTE	,939	,087	,968	10,831	,0001

Intervalle de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	7,791	7,929	7,804	7,916
PENTE	,739	1,139	,778	1,1



Régression Polynomiale X 1: %K2O Y 1: %SO3

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
24	,863	,745	,72	,072

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	2	,317	,158	30,605
RESIDUEL	21	,109	,005	p = ,0001
TOTAL	23	,425		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)]:	e ≥ 0:	e < 0:	Test de DW :
,24	13	11	2,206

Régression Polynomiale X 1: %K2O Y 1: %SO3

Expédition Groupe1

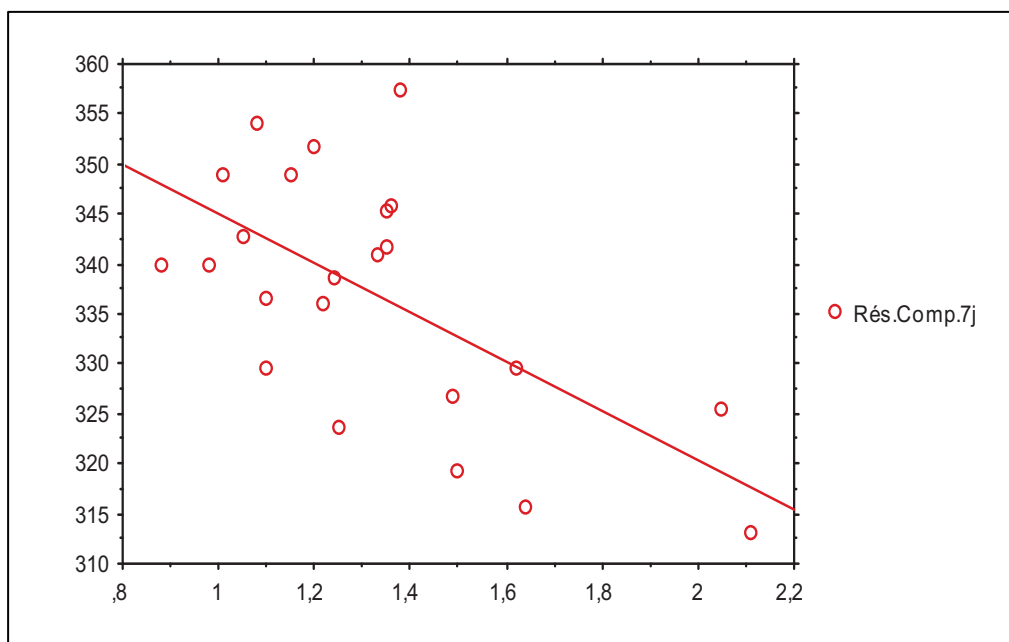
Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	-70,805				
x	204,679	45,864	34,083	4,463	,0002
x ²	-143,32	31,464	-34,788	4,555	,0002

Régression Polynomiale X 1 : %K2O Y 1 : %SO3

Intervalles de confiance et F partiel

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :	F Partiel :
CONSTANTE					
x	109,289	300,069	125,751	283,607	19,916
x ²	-208,76	-77,881	-197,467	-89,174	20,749



Régression Simple X 1 : %Rés. insol. Y 1 : Rés.Comp.7j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
23	,622	,386	,357	9,844

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	1280,666	1280,666	13,217
RESIDUEL	21	2034,791	96,895	p = ,0015
TOTAL	22	3315,456		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e 0 :	e < 0 :	Test de DW :
4470,259	10	13	2,197

Note : 1 cas supprimé avec val. manquantes.

Régression Simple X 1 : %Rés. insol. Y 1 : Rés.Comp.7j

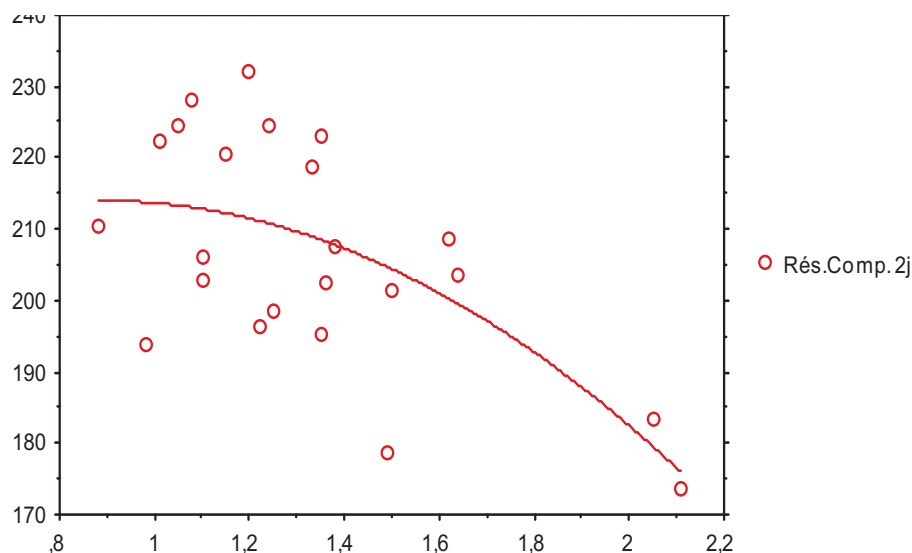
Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	369,579				
PENTE	-24,609	6,769	,622	3,636	,0015

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	332,741	341,278	333,477	340,542
PENTE	-38,687	-10,53	-36,258	-12,96

Expédition Groupe2



Régression Polynomiale X $\text{\%Rés. insol.}$ Y Rés.Comp. 2j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
23	,631	,398	,338	12,924

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	2	2210,349	1105,175	6,617
RESIDUEL	20	3340,385	167,019	p = ,0062
TOTAL	22	5550,734		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)]:	e $\geq$ 0:	e < 0:	Test de DW :
5597,805	11	12	1,676

Note : 1 cas supprimé avec val. manquantes.

Régression Polynomiale X $\text{\%Rés. insol.}$ Y Rés.Comp. 2j

Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	194,411				
x	44,503	68,389	,869	,651	,5226
x ²	-25,229	22,722	-1,482	1,11	,28

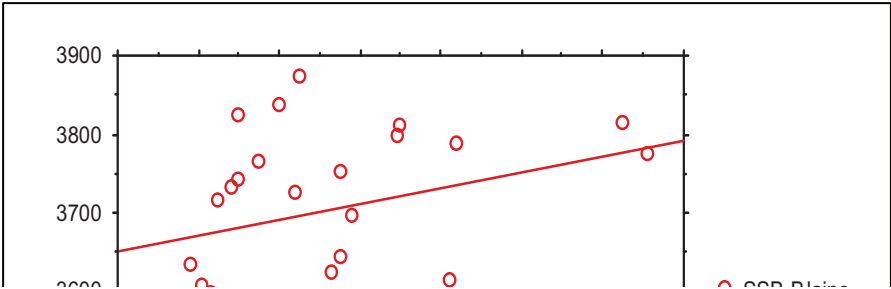
Régression Polynomiale X $\text{\%Rés. insol.}$ Y Rés.Comp. 2j

Intervalle de confiance et F partiel

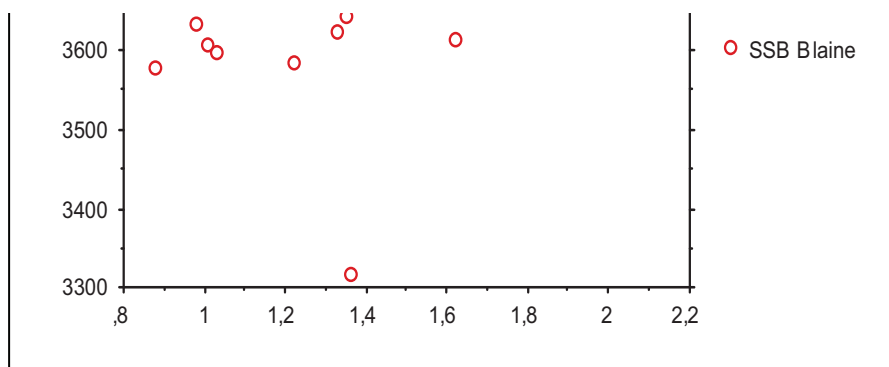
Variable :	95% Inf :	95% Sup :	90% Inf :	90% Sup :	F Partiel :
------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-------------

Expédition Groupe2

Intervalles de confiance de F partiel					
Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :	F Partiel :
CONSTANTE					
x	-98,168	187,174	-73,459	162,466	,423
x ²	-72,632	22,174	-64,423	13,964	1,233



Expédition Groupe2



Régression Simple X 1 : %Rés. insol. Y 1 : SSB Blaine

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
24	,258	,067	,024	119,704

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	22548,601	22548,601	1,574
RESIDUEL	22	315241,232	14329,147	p = ,2228
TOTAL	23	337789,833		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e ≥ 0 :	e < 0 :	Test de DW :
366215,15	13	11	1,162

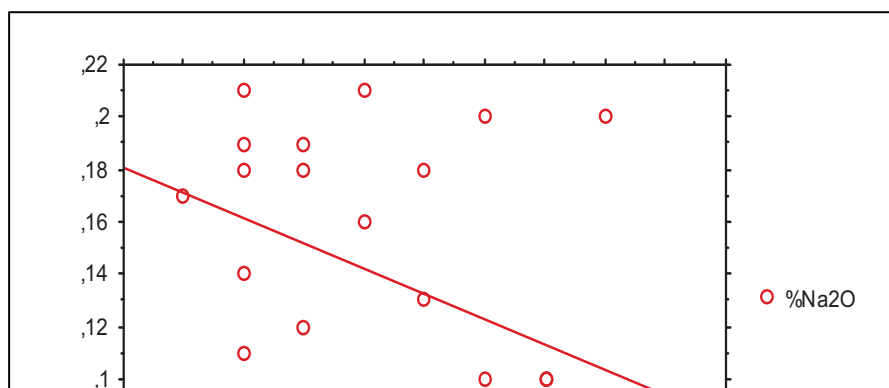
Régression Simple X 1 : %Rés. insol. Y 1 : SSB Blaine

Coefficient de régression

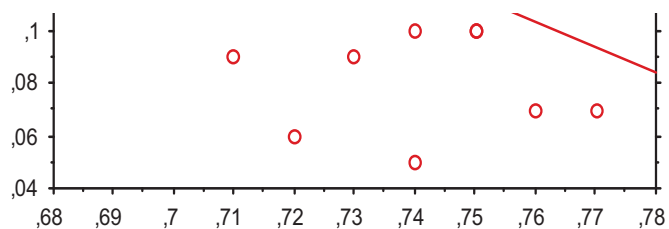
Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	3569,584				
PENTE	101,302	80,755	,258	1,254	,2228

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	3651,737	3753,096	3660,455	3744,378
PENTE	-66,191	268,796	-37,379	239,984



Expédition Groupe2



Régression Simple X 1 : %K2O Y 1 : %Na2O

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
24	,414	,171	,134	,049

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	,011	,011	4,55
RESIDUEL	22	,053	,002	p = ,0443
TOTAL	23	,063		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e // 0 :	e < 0 :	Test de DW :
,069	10	14	1,308

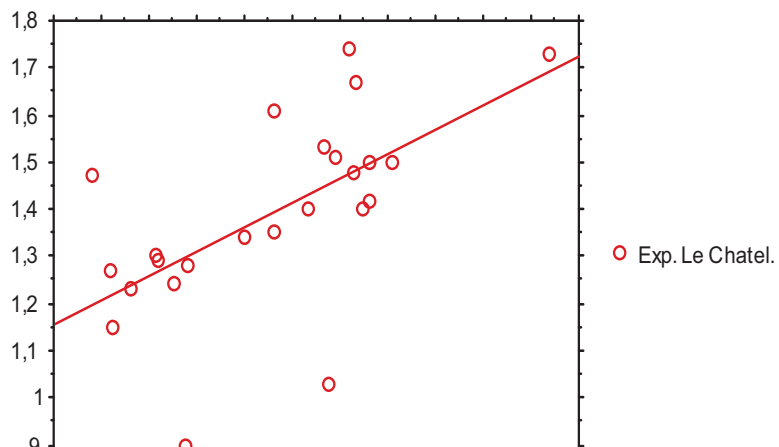
Régression Simple X 1 : %K2O Y 1 : %Na2O

Coefficient de régression

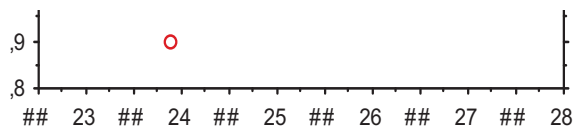
Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	,833				
PENTE	-,96	,45	-,414	2,133	,0443

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	,117	,158	,12	,155
PENTE	-1,894	-,027	-1,733	-,187



Expédition Groupe2



Régression Simple X 1: Résidu 45m Y 1: Exp. Le Chatel.

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
24	,61	,372	,343	,166

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	,358	,358	13,031
RESIDUEL	22	,605	,027	p = ,0016
TOTAL	23	,963		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e // 0 :	e < 0 :	Test de DW :
,93	12	12	1,539

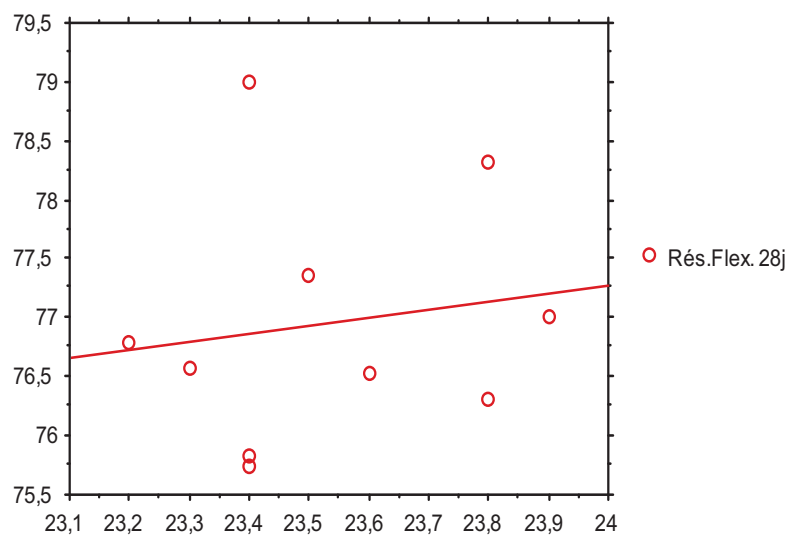
Régression Simple X 1: Résidu 45m Y 1: Exp. Le Chatel.

Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	-1,181				
PENTE	,104	,029	,61	3,61	,0016

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	1,319	1,459	1,331	1,447
PENTE	,044	,163	,054	,153



Expédition Groupe2

23,1 23,2 23,3 23,4 23,5 23,6 23,7 23,8 23,9 24

Régression Simple X 1 : % Eau Y 1 : Rés.Flex. 28j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
10	,156	,024	-,098	1,09

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	,238	,238	,2
RESIDUEL	8	9,508	1,189	p = ,6665
TOTAL	9	9,746		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e // 0 :	e < 0 :	Test de DW :
12,833	4	6	1,35

Note : 14 cas supprimés avec val. manquantes.

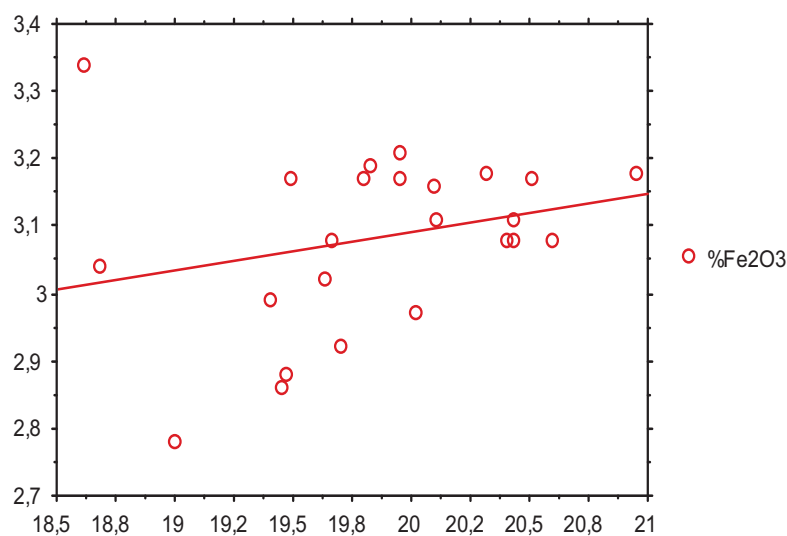
Régression Simple X 1 : % Eau Y 1 : Rés.Flex. 28j

Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	60,733				
PENTE	,689	1,54	,156	,447	,6665

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	76,151	77,741	76,305	77,587
PENTE	-2,863	4,241	-2,175	3,553



Régression Simple X 1 : %SiO2 Y 1 : %Fe2O3

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
24	,257	,066	,023	,128

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	,025	,025	1,551
RESIDUEL	22	,361	,016	p = ,2261
TOTAL	23	,387		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)] :	e // 0 :	e < 0 :	Test de DW :
,413	13	11	1,143

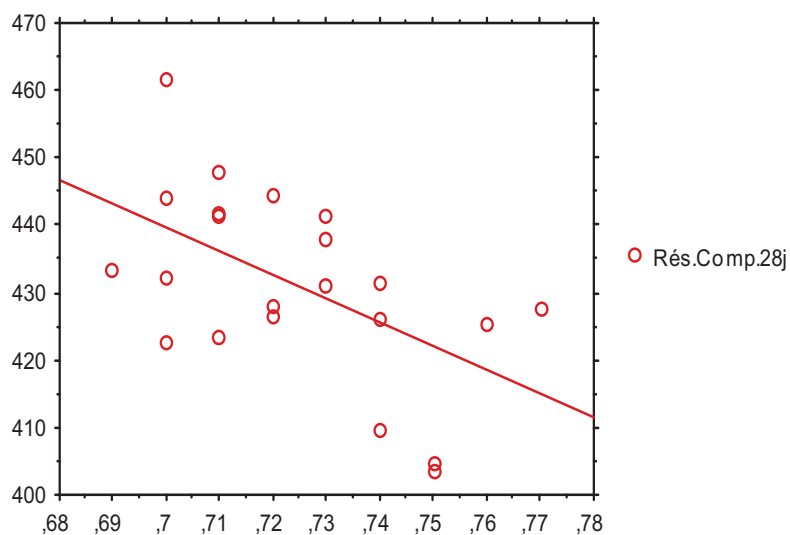
Régression Simple X 1 : %SiO2 Y 1 : %Fe2O3

Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	1,956				
PENTE	,057	,045	,257	1,245	,2261

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	3,027	3,135	3,036	3,126
PENTE	-,038	,151	-,021	,135

**Régression Simple X 1 : %K2O Y 1 : Rés.Comp.28j**

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
22	,544	,296	,261	11.995

Expédition Groupe2

22	,544	,296	,261	11,995
----	------	------	------	--------

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	1208,83	1208,83	8,402
RESIDUEL	20	2877,48	143,874	p = ,0089
TOTAL	21	4086,31		

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)]:	e 0:	e < 0:	Test de DW:
6370,298	13	9	2,214

Note : 2 cas supprimés avec val. manquantes.

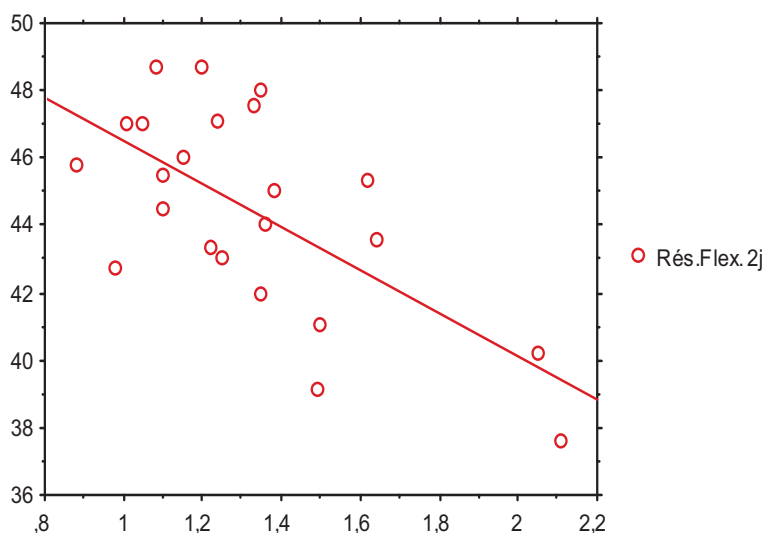
Régression Simple X ₁ : %K2O Y ₁ : Rés.Comp.28j

Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	683,731				
PENTE	-348,874	120,359	-,544	2,899	,0089

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	425,78	436,45	426,704	435,526
PENTE	-599,964	-97,783	-556,478	-141,269



Régression Simple X ₁ : %Rés. insol. Y ₁ : Rés.Flex. 2j

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
23	,652	,425	,398	2,359

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
--------	-------	-----------------	---------------	----------

Expédition Groupe2

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	86,444	86,444	15,533
RESIDUEL	21	116,866	5,565	p = ,0007
TOTAL	22	203,31		

Résidus			
SC[e(i)-e(i-1)]:	e ≥ 0:	e < 0:	Test de DW:
208,18	12	11	1,781

Note : 1 cas supprimé avec val. manquantes.

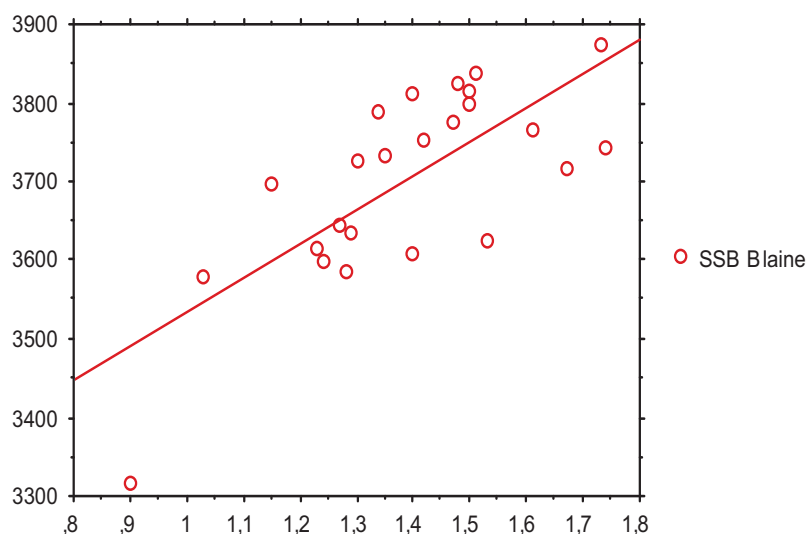
Régression Simple X ₁ : %Rés. insol. Y ₁ : Rés.Flex. 2j

Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	52,927				
PENTE	-6,394	1,622	-,652	3,941	,0007

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	43,442	45,488	43,619	45,312
PENTE	-9,767	-3,02	-9,185	-3,602



Régression Simple X ₁ : Exp. Le Chatel. Y ₁ : SSB Blaine

Fréquence :	R :	R-carré :	R-carré ajust. :	Ec.-type Résiduel :
24	,734	,539	,518	84,107

Analyse de la variance

Source	DDL :	S. des carrés :	Carré moyen :	Test-F :
REGRESSION	1	182163,174	182163,174	25,751
RESIDUEL	22	155626,659	7073,939	p = ,0001
TOTAL	23	337789,833		

Expédition Groupe2

TOTAL	23	337789,833		
-------	----	------------	--	--

Résidus

SC[e(i)-e(i-1)]:	e 0:	e < 0:	Test de DW:
389092,866	13	11	2,5

Régression Simple X ₁ : Exp. Le Chatel. Y ₁ : SSB Blaine

Coefficient de régression

Variable :	Coefficient :	Err. Std. :	Coeff. Std. :	(Valeur)-t :	Probabilité :
CONSTANTE	3098,162				
PENTE	434,977	85,717	,734	5,075	,0001

Intervalles de confiance

Variable :	95% Inf. :	95% Sup. :	90% Inf. :	90% Sup. :
MOY (X,Y)	3666,808	3738,025	3672,934	3731,9
PENTE	257,192	612,762	287,774	582,179

4.2 Résumé des résultats des régressions entre les paramètres du ciment.

Nous avons scindé les résultats des régressions en deux groupes selon les valeurs du taux de corrélation.

Le premier groupe correspond aux paramètres dont le taux de corrélation est approximativement supérieur à 79% pour atteindre 98%. Nous rappelons que certaines relations ont un faible taux de corrélation et ont été retenues car ce taux s'élève lorsque l'on considère la série de mesures équivalentes selon que l'on observe les paramètres à la sortie du broyeur ou à l'expédition. Ceci est le cas des relations qui relient la résistance à la flexion à 28 jours et le pourcentage de K_2O ; de la liaison entre le début de prise et la perte au feu à $1200^{\circ}C$ et enfin entre le pourcentage de SO_3 et le pourcentage de K_2O .

Il apparaît, selon ces résultats, que la mesure de la résistance à la compression à 2 jours est un bon indicateur de la résistance à la flexion à 28 jours avec un taux de corrélation $r = 85\%$, la relation qui les relie est :

$$y = 0,183 x - 2,858$$

avec y : résistance à la flexion à 28 jours.

x : résistance à la compression à 28 jours.

D'autres relations de ce type sont rassemblées dans les tableaux qui suivent.

Une relation remarquable est celle qui relie la fin de prise et le début de prise à l'expédition :

$$Y = 1,185 x + 35,712 \quad r = 98\%$$

avec y : fin de prise en mn.

x : début de prise en mn.

que nous avons comparée avec la formule proposée par Blombed du CERILH et cité par Vénuat [1] :

$$y = 1,5 x + 0.85 \quad r = 97\%$$

avec y = fin en prise en heures.

x = début de prise en heures.

ou si l'on exprime y et x en minutes :

$$y = 1.5 x + 51$$

La différence réside dans le fait que le ciment de l'usine de Ain Touta est de la classe 400.

Le second groupe ne fait pas partie de la présente étude mais montre les perspectives ouvertes par cette analyse.

CONCLUSION

L'étude en statistiques comparatives s'est avérée être un outil très puissant qui nous a permis une véritable décantation de l'analyse des différents paramètres mesurés sur la composition et comportement final du ciment portland artificiel. Elle nous a ainsi évité le croisement des observations sur 24 variables qui aurait nécessité $24 \times 24 / 2$ soit 248 analyses pour chacune des deux séries, broyeur et expédition, par les méthodes élémentaires et sur leur interprétation fastidieuse.

Nous avons ainsi éliminé d'emblée toute étude non pertinente pour concentrer l'effort sur les liaisons, au sens statistique du terme, susceptibles de donner des relations métriques exploitables.

Une représentation graphique normée des résultats des observations a permis d'avoir un aperçu des variations relatives des différents paramètres mesurés.

L'analyse en composantes principales, choisie pour son adéquation avec le type de variables mesurées a donné une vision synthétique du comportement variationnel des paramètres. Nous nous sommes passé des avantages de l'analyse factorielle de correspondance tels que l'équivalence distributionnelle afin d'éviter à avoir à choisir arbitrairement des catégories à l'intérieur des caractères appelés variables dans cette étude.

Ce renoncement n'est pas un handicap car les variables analysées bénéficient de nombreuses études analytiques et leur comportement physique est connu au préalable (voir chapitre 1) ; il ne restait qu'à rechercher des relations algébriques, aussi simple que possible, définissant leurs variations relatives.

Nous estimons avoir atteint ce but pour le ciment étudié, en l'occurrence le ciment portland artificiel ordinaire de la cimenterie de Ain Touta. Il est à noter que ce ciment de la classe réelle 400 est vendu sous la dénomination de la classe 325.

Il s'avère ainsi que la résistance à la compression à 2 jours ne donne aucune indication sur la résistance à 28 jours. Les autres relations entre les mesures de résistance peuvent être symbolisées de la manière suivante :

$$\begin{array}{ccc} \text{Résistance à la compression à 7 jours} & \rightarrow & \text{Résistance à la flexion à 7 jours} \\ \downarrow & & \downarrow \\ \text{Résistance à la compression à 28 jours} & \rightarrow & \text{Résistance à la flexion à 28 jours} \end{array}$$

ou d'une manière plus simplifiée, la résistance à la compression à 7 jours permet de prévoir la résistance à la compression à 28 jours, la résistance à la flexion à 7 jours et la résistance à la flexion à 28 jours selon les relations citées dans le résumé des résultats du chapitre 4.

Les perspectives d'études sont assez fécondes :

- la proportion en eau résiduelle dans la poudre de ciment paraît influencer d'une manière positive sur la résistance à la compression à 28 jours, il serait intéressant de savoir jusqu'à quelle limite ;

- K_2O influe de manière négative sur la résistance à la flexion à 28 jours mais pas de manière évidente sur la résistance à la compression, ceci seulement à la phase expédition du ciment et de manière positive à la sortie du broyeur ;

- la variation de la proportion de SO_3 en fonction de la proportion de K_2O est positive à la sortie du broyeur et négative à l'expédition, le taux de corrélation à l'expédition, voisin de 86%, indique une liaison avérée et il serait intéressant de vérifier si cela est dû à un comportement résultant du traitement lors du processus de fabrication du ciment ou simplement des proportions présentes initialement dans le minerai.

Les tableaux du deuxième groupe nécessitent à eux seuls des études approfondies afin de confirmer ou d'infirmer les relations établies.

REFERENCES

- | | | |
|------|---|---|
| [1] | Michel VENUAT | La pratique des ciments et bétons.
Edit. du Moniteur . France 1976. |
| [2] | N.JACKSON | Civil Engineering Materials
English language book society and Mc Millan. |
| [3] | R.H.BOGUE | Chemistry of Portland Cement
New York,Reinhold - 1955. |
| [4] | F.M.LEA | The chemistry of cement and concrete
London Arnold - 1970. |
| [5] | T.KNUDSUEN | Quantitative analysis of the compound of cement
and cement clinker by X-ray diffraction
Amer. Ceramic Soc. Bul.55, N°12,p.1052-
5,Dec.1976. |
| [6] | A.M.NEVILLE | Properties of concrete
Pitman 1981 - p.9-10 - p.41-45. |
| [7] | NGUYEN THUC TUYEN | Cours de technologie du béton.
C.U. M'Sila 1990. |
| [8] | H.H.STEINOUR | The reactions of thermo-chemistry of cement
hydrati at ordinary temperature.
Proc.3rd Int. Symp. on the chemistry of cement.
London 1952 p.261-89. |
| [9] | R.H.BOGUE and W.LERCH | Hydration of Portland cement compounds.
Industrial and Engineering Chemistry N°8 p.837-
47 Easton,Pa.,1934. |
| [10] | T.C.POWERS | The non-evaporable water content of hardened
Portland Cement Paste.
ASTM bul.N°158,p.68-76 - May 1949. |
| [11] | L.E.COPELAND
D.L.KANTRO
G.VERBECK | .

Chemistry of hydration of Portland Cement.
Proc. 4th Int. Symp. on the chemistry of cement.
Washington D.C. 1960 - p.429-65. |

- [12] P.SELIGMAN
N.R.GREENING
Studies of early hydration reactions of Portland cement by X-ray diffraction.
Highway Research Record N°62 - p.80-105.
Washington D.C. 1964.
- [13] J.W.JEFFERY
J.D.BERNAL
H.F.W.TAYLOR
Crystallographic research on the hydration of Portland cement.
Mag. Concr. Res. N°11 - 1952
- [14] S.BRUNAUER
J.SKALNY
I.ODLER
M.YUDENFREUND
Hardened Portland cement pastes of low porosity.
Cement and concrete Research N°3- p.279-94 - May 1973.
- [15] W.H.PRICE
Factors influencing concrete strength.
J. Amer. Concrete. Inst. - p.417-22 - Feb.1951.
- [16] S.BRUAUR
P.H.EMMET
E.TELLER
Absorption of gases in multi-molecular layers.
J. Amer. Chem. Soc. - p.309-19 - 1938.
- [17] W.J. Mc COY
D.L.ESHENOUR
Significance of total and water soluble alkali contents of cement.
Proc. 5th Int. Symp. on the chemistry of cement.
Tokyo - 1968 - p.437-43.
- [18] M.H.WILLS
Accelerated strength tests.
ASTM Sp. Tech. Public. N°169B - p.162-79 - 1978.
- [19] R.F.FELDMAN
P.J.SEREDA
A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties.
Material and structures N°6 - p.509-19 - Paris 1968.
- [20] M.DOHNALIK
K.FLAGA.
Nowe sportizen w problemie ezanu wiazania cementu
Archiwum Inzynierii Ladowej N°4 - p.745-52 - 1970.

- [21] J.H.SPROUSE
A.B.PEPPLER
Setting time.
ASTM Sp. Tech. Publ. N°169B - p.105-21 - 1978
- [22] S.WALKER
D.L.BLOEM
Variations in Portland cement.
Proc. ASTM - p.1009-32 - 1958.
- [23] F.GIORISSE
Essais et contrôle des bétons.
Eyrolles - 1978 - p.25-32.
- [24] G.DREUX
Nouveau guide du béton.
Eyrolles - 1981 - p.16-33
- [25] Jean DE LAGARDE
Initiation à l'analyse des données
Dunod 1er tr. 1983.
- [26] H. VENTSEL
Théorie des probabilités
Mir (Moscou 1973).
- [27] A.BOROVKOV
Statistique mathématique
Mir (Moscou 1987).
- [28] P.PACE
R.CLUSEL
Statistique et probabilité
Delagrave (Paris 1982).
- [29] Centre National de Recherche en Génie Parasismique.
Contrôle de qualité des ouvrages en génie civil.
OPU (Alger 1988).
- [30] L.LEBART
A.MORINEAU
N.TABARD
Technique de la description statistique
Méthodes et logiciels pour l'analyse de grands
tableaux.
Dunod 1982.
- [31] J.P. BENZECRI et coll.
Pratique de l'analyse des données Tome 1,2 et
3.
Dunod (1980-1981).
- [32] J.P.BENZECRI et coll.
L'analyse des données
Tome 1: la taxinomie
Tome 2: l'analyse de correspondance.
Dunod (1980-1982).
- [33] Collectif
Classification automatique des données.
Dunod 1989.

- [34] Collectif Statistique et informatique.
Ed. Atlas (93-94).
- [35] N.JACKSON Civil Engineering Materials
English Language Book and Mac Millan (1978).
- [36] Y.EVRARD Information et décision en marketing.
P. LEMAIRE Dalloz (1er ed. 1976).
- [37]AKAIKE H. (1983). Information measures and model Selection. Bulletin of the International Statistical Institute : Proceedings of the 44th Session, Volume 1. Pages 277-290.
- [38] ASQC/AIAG (1990). Measurement systems analysis reference manual. Troy, MI: AIAG.
- [39] ASQC/AIAG (1991). Fundamental statistical process control reference manual. Troy, MI: AIAG.
- [40] BAGOZZI R. P. & Yi Y. (1989). On the use of structural equation models in experimental design. Journal of Marketing Research, 26, 271-284.
- [41] BAGOZZI R. P. , Yi Y. & SINGH, S. (1991). On the use of structural equation models in experimental designs : Two extensions. International Journal of Research in Marketing, 8, 125-140.
- [42] BARKER T. B. (1986). Quality engineering by design : Taguchi's philosophy. Quality Progress, 19, 32-42.
- [43] BATES D. M. & WATTS D. G. (1988). Nonlinear regression analyse and its applications. New York : Wiley.
- [44] BLIGNENE M. W. & SHAPIRO A. (1991). Invariance of covariance structures under groups of transformations. Metrika , 38, 335-345.
- [45] BLIGNENE M. W. & CUDECK R. (1992). Alternative ways of assessing model fit. In K.A. Bollen and J. S. Long (Eds.), Testing structural equation models. Beverly Hills, CA : Sage.
- [46] BUJA A. & TUKEY P. A. (Eds.) (1991). Computing and Graphics in Statistics. New York. Springer-Verlag.
- [47] COLE D. A., MAXWELL S. E., ARVEY R. & SALAS E. (1993). Multivariate group comparisons of variable systems : MANOVA and Modélisation d'Equation Structurelle. Psychological Bulletin, 114, 174-184.

- [48] DAVID H. A. (1995). First (?) occurrence of common terms in mathematical statistics. *The American Statistician*, 49, 121-133.
- [49] DODGE Y. , FEDOROV V. V. & WYNN H. P. (1988). *Optimal design and analyse of experiments*. New York : North-Holland.
- [50] MONTGOMERY D. C. (1991) *Design and analysis of experiments* (3rd ed.). New York :Wiley.
- [51] RODRIGUEZ R. N. (1992). Recent developments in process capability analysis. *Journal of Quality Technology*, 24, 176-187.
- [52] SHIRLAND L. E. (1993). *Statistical quality control with microcomputer applications*. New York: Wiley.
- [53] StatSoft France (1997). *STATISTICA pour Windows [Manuel du Programme]* : StatSoft France - 72, quai des Carrières - 94220 Charenton-le-Pont. Tél : 01-45-185-999, fax : 01- 45-185-285.
- [54] Abacus concepts. Inc. (1988). *StatView. Version 1.03* Berkeley U.S.A.
- [55] ADAM M. Guide pratique pour l'emploi des ciments (1976) : Eyrolles Paris.
- [56] KOMAR A. Matériaux et éléments de construction (1978) : Mir Moscou.

SITES INTERNET CONSULTÉS

[57] **Ciments Vigier SA - VIGIER CEM II/A-L 32.5 R**

utilisation pratique VIGIER CEM II/A-L 32.5 R Ciment Portland au calcaire fiche de données de sécurité Utilisation Le ciment Portland au calcaire VIGIER CEM II/A-L 32,5 R peut-être utilisé pour la fabrication de bétons et mortiers r
http://www.vicem.ch/produits/cem32_5/2_4f.htm

[58] **Base FTSS du CCHST - Essroc, Italcementi Group**

Base FTSS du CCHST - Essroc, Italcementi Group [Concernant FTSS] [Aide] [Avertissement] [Service à la clientèle] [Recherche rapide] [Recherche détaillée] [Parcourir liste des collaborateurs] Cette compagnie fournit ses fich
http://ccinfoweb.ccohs.ca/ftss/browse/Essroc_Italcementi_Group.html

[59] **EUR-Lex: Législation communautaire en vigueur - Document 397D0555**

Législation communautaire en vigueur Document 397D0555 Chapitres du répertoire où le document peut être trouvé: [13.30.99 - Autres secteurs de rapprochement des législations] 397D0555 97/555/CE: Décision de la Commission du 14 juillet 1997 .
http://europa.eu.int/eur-lex/fr/lif/dat/1997/fr_397D0555.html

[60] **Publication:s96/022**

Publication:s96/022
<http://www-spht.cea.fr/spht/articles/s96/022>

[61] **EUR-Lex: Législation communautaire en vigueur - Document 369D0152**

Législation communautaire en vigueur Document 369D0152 Chapitres du répertoire où le document peut être trouvé: [08.20.20 - Accords autorisés, exemptions et attestations négatives] 369D0152 69/152/CEE: Décision de la Commission, du 5 mai 1969.
http://europa.eu.int/eur-lex/fr/lif/dat/1969/fr_369D0152.html

[62] **MIC - L'industrie chimique au Québec**

L'industrie chimique au Québec Associations de fabricants de produits chimiques (associations actives au Québec) Association canadienne des fabricants de produits chimiques Association canadienne des fabricants de spécialités chimiques (anglais seul
<http://www.micst.gouv.qc.ca/secteurs-industriels/chimique/associations.html>

[63] **Utilisation des Céramiques bâtiment**

Utilisations des Céramiques Réfractaire Sanitaire-Carrelage Porcelaine-Faïence Bâtiment Fonderie Bâtiment Bâtiment Les matériaux modernes et les techniques nouvelles employés dans le bâtiment aujourd'hui ont conduit AGS-BMP à déve
http://www.ags-bmp.com/utilisation_ceram_batiment.htm

[64] **InfraStructures**

Catalogue 1997-1998 L'Association Canadienne du Ciment Portland présente le catalogue des publications du PCA "Concrete Solutions '97-'98". Ce catalogue contient un supplément canadien où se retrouvent de nombreuses publications canadiennes en langue française.
<http://www.infrastructures.com/0597/catalogue.htm>

[65] [Les Produits d'agrégats du Québec : Calculs utiles pour le stuc d'agrégats](#)
produits agrégats du Québec CALCULS UTILES POUR LE STUC D'AGRÉGATS 1
paquet de latte (10 feuilles) couvre 150 pi 2 utilisables (160 pi 2 moins superposition
requis au joint de rencontre) 1 sac de pierres (100 lb) couvre 50 pi 2 (3 sacs de pierres p
<http://www.agregats.com/html/calcul.htm>

[66] [Cours no CIV6505 - Etudes supérieures - Polytechnique Montreal](#)
Annuaire 2000-2001 - Études supérieures Description du cours CIV6505 CIV6505
Techniques du béton (3-0-6) 3 cr. Hiver Le ciment Portland : fabrication, normes,
signification d'une analyse chimique. Déroulement de la prise, du d
<http://www.cours.polymtl.ca/annuaire/civ6505.htm>

[67] [GCIV3110 - Matériaux de construction](#)
Répertoire 2000-2001
http://www2.umoncton.ca/cfdocs/repertoire/1er_cycle/gciv3110.htm

[68] [Quebec Concrete Homes Main Screen](#)
Quebec Association Canadienne du Ciment Portland Tél : (514) 739-2722 Fax : (514)
739-6514 Pionnier dans l'utilisation des coffrages isolants, le Québec est en mesure
d'offrir aux acheteurs le choix entre quatre fournisseurs principaux qu
<http://www.concretehomes.com/PQ/lcquebec.htm>

[69] [Bulletin UE 1/2-1996 \(fr\): 1.4.39](#)
[Sommaire | Précédente | Suivante | Index | Index cum. | Bull.disponibles | Accueil]
Bulletin UE 1/2-1996 Politique commerciale commune (15/33) 1.4.39. Décision 96/72/CE
de la Commission, portant clôture de la procédure antidumping concernant les
<http://europa.eu.int/abc/doc/off/bull/fr/9601/p104039.htm>

[70] [Sika Canada - Division Construction](#)
Sikacem ® 810 Adjuvant de latex/ fumée de silice pour mortier, béton et coulis d'adhésion
de ciment Portland A-110 DESCRIPTION: Sikacem 810 est un produit breveté, c'est un
adjuvant de latex/ fumée de silice qui augmente l'adhérence, les p
<http://www.sikacanada.com/fr/constr/cat/cr/a110.htm>

[71] [MATÉRIAUX CIMENTAIRES](#)
MATÉRIAUX CIMENTAIRES, INSTRUMENTATION ET APPLICATIONS
Regroupement Centre de recherche interuniversitaire sur le béton (CRIB) Volet Université
de Sherbrooke Fondé au milieu des années 1980 .
<http://www.usherb.ca/bleu/industrie/materiau/fjolicoe.html>

[72] [CBD-163-F. Mortier pour maçonnerie](#)
CBD-163-F. Mortier pour maçonnerie J.I. Davison Le mortier à maçonnerie est un
matériau polyvalent pouvant satisfaire à une variété d'exigences parfois contradictoires.
Toutefois, contrairement à l'opinion générale, il n'existe pas de mortier «universel ».
<http://www.nrc.ca/irc/cbd/cbd163f.html>

[73] [Quebec Concrete Homes](#)

Information on using insulating concrete forms, concrete masonry, and aerated concrete for homebuilding, plus other innovative concrete products for floors, decorative trim, siding, roofing, driveways and patios.

[*http://www.concretehomes.com/PQ*](http://www.concretehomes.com/PQ)

[74] <http://www.quid.fr/WEB/PRINCIPA/Q047410.HTM>

Ciment Industrie pharmaceutique (4) Sommaire Secteur électronique Ciment Ciment Généralités Quelques dates 1817 le Français Louis Vicat (1786-1861) explique que l'aptitude de certaines chaux maigres à durcir sous l'eau vient de la pré

[*http://www.quid.fr/WEB/PRINCIPA/Q047410.HTM*](http://www.quid.fr/WEB/PRINCIPA/Q047410.HTM)

[75] [Calcium](#)

Informations sur le calcium

[*http://le-village.iffrance.com/okapi/calcium.htm*](http://le-village.iffrance.com/okapi/calcium.htm)

[76] [Bulletins Technical : Comparaison des effets de différents systèmes de construction sur l'environnement](#)

Canadian Wood Council : Bulletins Technical : Comparaison des effets de différents systèmes de construction sur l'environnement

[*http://www.cwc.ca/francais/publications/technical_bulletins/tech_bulletins_4/page9.html*](http://www.cwc.ca/francais/publications/technical_bulletins/tech_bulletins_4/page9.html)

[77] [Sika Canada - Division Construction](#)

Sikaset ® C Accélérateur de prise pour le béton et le mortier C-140 DESCRIPTION: Liquide incolore. Accélérateur de prise pour le béton et le mortier de ciment Portland. OÙ UTILISER: Un adjuvant pour le béton ou le mortier perme

[*http://www.sikacanada.com/fr/constr/cat/ap/c140.htm*](http://www.sikacanada.com/fr/constr/cat/ap/c140.htm)

[78] [Sika Canada - Division Construction](#)

Intraplast®N Agent d'expansion pour coulis B-100 DESCRIPTION: Une poudre grise d'un mélange bien équilibré d'agents expansifs, plastifiants et réducteurs d'eau. Ne contient aucun chlorure de calcium, nitrate ou autres matières c

[*http://www.sikacanada.com/fr/constr/cat/gp/b100.htm*](http://www.sikacanada.com/fr/constr/cat/gp/b100.htm)

[79] [MATÉRIAUX CIMENTAIRES](#)

MATÉRIAUX CIMENTAIRES, INSTRUMENTATION ET APPLICATIONS

Recherche Centre de recherche interuniversitaire sur le béton (CRIB) Volet Université de Sherbrooke Fondé au milieu des années 1980 à l'initiative

[*http://www.usherb.ca/bleu/industrie/materiau/ftagnit.html*](http://www.usherb.ca/bleu/industrie/materiau/ftagnit.html)

[80] [L'AMIANTE CHRYSOTILE : UN APERÇU](#)

Le ciment-chrysotile : qualité, durabilité et sécurité 90 % de la production mondiale de chrysotile sert aujourd'hui à fabriquer du ciment renforcé, le ciment-chrysotile. Il serait difficile de s'en passer. En ajoutant 10 % à 15 % de fibres de chr

http://www.asbestos-institute.ca/presse/presse_3.html

[81] [ciments](#)

Généralités sur les ciments DEFINITION Le ciment est un liant hydraulique. C'est-à-dire un composé chimique qui, en présence d'eau, réagit avec celle-ci pour former un nouveau corps chimique capable de développer des résistances mécaniques

<http://www.ac-noumea.nc/jules-garnier/prepa2/generalites.htm>

[82] [Ciments Vigier SA - Vigier aujourd'hui](#)

Ciments Vigier SA aujourd'hui Ciments Vigier SA à Péry qui développe l'essentiel de ses activités dans l'espace économique du Mittelland, est une entreprise du groupe Vigier Holding SA . Le ciment Portland est produit à Péry depuis 1891. P

http://www.vicem.ch/vir/aujourd_hui/1_2f.htm

[83] [Laboratoire de Minéralogie-Cristallographie \(LMCP\)](#)

Laboratoire des universités P.M. Curie et D. Diderot, associé au CNRS.

<http://www.lmcp.jussieu.fr/> - Tous Publics - Site français en Français
epelboin@lmcp.jussieu.fr

[84] [Publication:s96/023](#)

Publication:s96/023

<http://www-spht cea.fr/spht/articles/s96/023>

[85] [Untitled Document](#)

CEMENT & CONCRETE Asmar S.A. Av Moulay Hassan I Prolongée B.P. 550 40000 Marrakech Fabrication de ciments artificiels Asment Témara S.A. Ain Attig 12000 Témara Production de ciment Cementos

http://www.babnet.com/business/table_3.html

[86] [Quelques analyses](#)

Accueil Informations générales Vendre Investir Opportunités Actualités Coup d'oeil économique English Quelques analyses... IMPACT DE LA CRISE SUR LE SECTEUR DU CIMENT La Thaïlande est clairement en surcapacité Selon les

<http://www.dree.org/thaillande/francais/news/analyse/ana6.htm>

[87] [CCM : Recommandation T1-96 - Note n°3](#)

NOTE N°3 L'alcali-réaction dans les bétons Sommaire Généralités Pathologie et manifestations externes Introduction Le dépistage des granulats réactifs Les recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction Les méthodes d'essais

http://www.finances.gouv.fr/CCM/t1_96/recann3.htm

[88] [Association béton Québec](#)

page d'accueil le Mot de la présidente ! la nouvelle norme de qualité de l'industrie du béton . les activités et publications de l'ABQ liste des producteurs de béton agréés par l'ABQ La revue BÉTON: Bâtiment, infrastructures et ouvrages d'art Les

<http://www.ciec.net/sites/abq/liste4.html>

[89] **Béton Canada**

La gestion de Béton Canada De façon à conserver une administration aussi directe que possible, Béton Canada s'est doté d'une structure de gestion très allégée. Des dirigeants d'entreprise siègent au conseil d'administration et des administrateurs ex

<http://www.usherb.ca/CENTRES/beton/adm/gest-fr.html>

[90] **Universite Paul Sabatier - Toulouse - France - DEUG**

Mécanique 2 - Construction GC2 Code : DDTGSC2M Responsable : Mme G. ARLIGUIE
Labo Matériaux et Durabilité des Constructions Bât. Géotechnique Université Paul
Sabatier 118, route de Narbonne 31062 Toulouse cedex Tél. : 05 61 55 67 08 Secrétariat

<http://www.ups-tlse.fr/FI/COMMUN1/tgsc2.html>

[91] **CRDI Explore : Les maisons de cendres (juillet 1993)**

CRDI : Ressources : Explore : Vol.21, No.2 Les maisons de cendres Le monde entier craint les volcans pour leur violence, terrifiante et dévastatrice. Pour certains chercheurs d'Amérique latine, d'Afrique et du Canada, cependant, les volcans f

<http://www.idrc.ca/books/reports/f212/cendres.html>

[92] **Publication:s96/038**

Publication:s96/038

<http://www-spht.cea.fr/spht/articles/s96/038>

[93] **Publications de CASABLANCA :**

L'élaboration d'un matériau à base de liant hydraulique : « Une alchimie complexe »
Bruno ESPINOSA, LAFARGE Laboratoire Central de Recherche 1/ Introduction Les
mortiers à base de liants hydrauliques peuplent l'univers de la construction

<http://www-lagep.cpe.fr/nouveautes/casa2000actes/Espinosa1.htm>

[94] **Les Produits d'agréats du Québec : Renseignements techniques**

produits agrégats du Québec CRÉPI DE CIMENT ET STUC AVEC AGRÉGATS
GÉNÉRALITÉS Fournir les fiches techniques des fabricants, selon les prescriptions de la
Section 01001. Soumettre des échantillons du travail, selon les prescriptions de la Section
01001.

<http://www.agregats.com/html/tech.htm>

[95] **Glossaire**

GLOSSAIRE Assise: base solide sur laquelle repose une construction. Béton: mélange
d'eau, de ciment et d'agréats (sable, gravillons et cailloux). Béton armé: béton coulé
autour d'une armature métallique lui permettant de mieux résister aux efforts

<http://www.operum-via.ch/Pages/Glossaire.htm>

[96] **Les institutions intervenant sur le secteur industriel**

PRESENTATION DE LA BRANCHE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION
DOMAINE D'ACTIVITE DE LA BRANCHE: L'industrie des Matériaux de
Construction couvre les principales activités suivantes : Liants hydrauliques : ciment,
amiant, plâtre et chaux Prod

<http://www.mir-algeria.org/materiaux.htm>

[97] [Département de génie civil](#)

Index : A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z Information d'affaires par secteur Matériaux de pointe Certains liens hypertextes de cette page mènent à des sites à l'extérieur du gouvernement fédéral, dont le contenu n'est disponible
<http://strategis.ic.gc.ca/SSGF/mp00150f.html>

[98] [Ecole d'Avignon](#)

l'Ecole d'Avignon, consultant pour tous les acteurs du patrimoine architectural
<http://www.ecole-avignon.com/conseil/hongrie2.htm>

[99] [PORTLANDITE](#)

PORTLANDITE History / Historique Authors / Auteurs (inventeurs) : TILLEY Discovery date / Date de découverte : 1933 Etymology / Etymologie : D'après sa présence dans le ciment PORTLAND Town of Origin / Localité-type : SCAWT HILL, ANTRIM CO. Country
<http://cri.ensmp.fr/euromin/mineraux/PORTLANDITE.html>

[100] [CBD-241-F. Le béton modifié aux résines](#)

CBD-241-F. Le béton modifié aux résines A. Blaga et J.J. Beaudoin Résumé Il existe deux catégories de béton modifié aux résines : le béton imprégné de résine et le béton additionné de résine. On obtient le premier en imprégnant des éléments préfabr
<http://www.ccbfc.org/irc/cbd/cbd241f.html>

[101] [Produit ChimiBat n°3](#)

La Chimie du Batiment TYPE MARQUE DEFINITIONS ET DOMAINES D'APPLICATION CONSOM- MATION CONDITION- NEMENT Colle de Reprise CB LATEX 038005 038130 CEBTP 582.7.426.2 GARANTIE DECENNALE 924.198.015 Résine blanche concentrée à 44,5 % d'extrait sec
<http://chimibat.ifrance.com/chimibat/prod03.htm>

[102] [Diapositive PPT](#)

Diapositive PPT Panneaux bois-ciment et bois-gypse particules de bois avec ciment Portland ou gypse largement utilisés en Allemagne pour le revêtement des murs intérieurs résistant au feu et à la pourriture bonnes propriétés acoustiques en déve
<http://www.xylo.for.ulaval.ca/sbo17195/docs/cours1/tsld009.htm>

[103] [SIL: LASTRE PIANE](#)

La préfabrication industrielle et résidentielle est déjà devenue un fait réel et concret dans la majeure partie du nord de l'Europe et de l'Amérique. Il est déjà prouvé que c'est la seule solution pour réduire la croissance dynamique des coûts.
<http://www.sil-lastre.com/f-rampia.htm>

[104] [Propriétés des solides](#)

Propriétés des solides Matériel Chaleur spécifique Densité Conductivité - Btu/(lb)(F) lb/ft 3 Btu ft/(ft 2 F h) Aluminium (1100) 0.214 171 128 Amiante (fibre) .25 150 0.097 Cendres de bois 0.2 40 0.041 Asphalte 0.22 132 0.43 Laiton rouge (85%Cu, 15%
http://www.callisto.si.usherb.ca/~85675489/Mvt_Chalm.html/Propri-solide.html

- [105] **EUR-Lex: Législation communautaire en vigueur - Document 372D0068**
Législation communautaire en vigueur Document 372D0068 Chapitres du répertoire où le document peut être trouvé: [08.20.10 - Accords interdits] 372D0068 72/68/CEE:
Décision de la Commission, du 23 décembre 1971, relative à une procédure au titre de
http://europa.eu.int/eur-lex/fr/lif/dat/1972/fr_372D0068.html
- [106] **CRDI: Des panneaux muraux à partir de déchets industriels**
CRDI : Ressources: Nayudamma In English Des panneaux muraux à partir de déchets industriels Introduction Incidences Préalables Utilisateurs éventuels Points de contact
Ressources Introduction Au Brésil, comme dans la majeure partie de l'Am
http://www.crdi.ca/nayudamma/wall_55f.html
- [107] **Sika Canada - Division Construction**
Sikament 300 Adjuvant superplastifiant et réducteur d'eau de gâchage pour le béton C-120
DESCRIPTION: Un adjuvant liquide à double usage, employé comme superplastifiant ou comme réducteur d'eau. C'est un adjuvant qui n'entraîne pas d'air, à pri
<http://www.sikacanada.com/fr/constr/cat/ap/c120.htm>
- [108] **EUR-Lex: Législation communautaire en vigueur - Document 372D0468**
Législation communautaire en vigueur Document 372D0468 Chapitres du répertoire où le document peut être trouvé: [08.20.10 - Accords interdits] 372D0468 72/468/CEE:
Décision de la Commission, du 18 décembre 1972 .
http://europa.eu.int/eur-lex/fr/lif/dat/1972/fr_372D0468.html
- [109] **Solution: Service de distillation par ignition et par aspiration**
Index : A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z Information d'affaires par secteur Solutions environnementales canadiennes GO TO: EnviroEbiz Virtual Office
Le Bureau de la performance environnementale des entreprises canadiennes.
<http://strategis.ic.gc.ca/SSGF/es30610f.html>
- [110] **Solution: Service de distillation fractionnée**
Index : A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z Information d'affaires par secteur Solutions environnementales canadiennes GO TO: EnviroEbiz Virtual Office
Le Bureau de la performance environnementale des entreprises canadiennes .
<http://strategis.ic.gc.ca/SSGF/es30623f.html>
- [111] **<http://www.ugr.es/~arqtec/f-materiaux%20de%20constructionI.htm>**
PROGRAMME DE MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION I PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION. LEÇON 1: Matière et matériel.- Détermination des propriétés des matériaux: concept d'essai.- Types d'essais: organoleptiques, in situ, laboratoire.- Concept de normalisation.
<http://www.ugr.es/~arqtec/f-materiaux%20de%20constructionI.htm>

- [112] **CHIMIE DES HAUTES TEMPÉRATURES**
271-112-84 3-3-3 3,00 CHIMIE DES HAUTES TEMPÉRATURES OBJECTIFS Chaque élève devra être capable de s'initier aux processus résultant de l'application des hautes températures à différents systèmes; décrire ces processus par une analyse thermodynamique
<http://www.meq.gouv.qc.ca/ens-sup/ens-coll/Cahiers/cours-comp/cours271/27111284.HTM>
- [113] **Les Produits d'agréats du Québec : Le stuc d'agréats**
produits agrégats du Québec LE STUC D'AGRÉGATS La qualité d'un travail de revêtement d'agréats exposés repose sur deux éléments essentiels : des matériaux de première qualité et un exécutant possédant les meilleures connaissances de réalisation d'un t
<http://www.agregats.com/html/stuc.htm>
- [114] **Construction, génie et services connexes**
Passer à Menu principal Information d'affaires par secteur Construction, génie et services connexes Industrie de services et grands projets - Construction résidentielle Fabricants de matériaux Les fabricants canadiens de matériaux ne cessent de pe
http://strategis.ic.gc.ca/sc_indps/service/rescon/frndoc/matprodf.html d'acheter U.S. Cem
<http://www.newswire.ca/releases/August1999/30/c6692.html>
- [115] **Sandaur**
Présentation de Sandaur, la matériauthèque du BTP.
<http://www.sandaur.com> - Professionnel - Site français en Français
jacques.achard@wanadoo.fr
- [116] **Sika Canada - Construction Division**
Albitol Concentrate ® Émulsion d'acétate de polyvinyle, agent de liaisonnement et adjuvant pour ciment Portland et béton A-125 DESCRIPTION: Albitol Concentrate est un adjuvant composé d'une émulsion latex de plastique PVAC concentré
<http://www.sikacanada.com/fr/constr/cat/cr/a125B.htm>
- [117] **CBD-15-F. Le béton**
CBD-15-F. Le béton N. B. Hutcheon L'emploi généralisé du béton est la preuve irréfutable des avantages exceptionnels de ce matériau de construction. Le béton en fait nous est si familier que nous oublions parfois le processus remarquable par lequel
<http://codes.nrc.ca/irc/cbd/cbd015f.html>
- [118] **Contexte de matériaux de construction**
Index : A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z Information d'affaires par secteur Contexte de Matériaux de construction Les matériaux de construction forment le troisième pilier du champ de responsabilité de la Direction
<http://strategis.ic.gc.ca/SSGF/mm01676f.html>
- [119] **Sika Canada - Division Construction**
Sika ® Latex R Latex acrylique, agent de liaisonnement et adjuvant pour mortiers et bétons de ciment Portland A-130 DESCRIPTION: Sika Latex R est un latex polymère-acrylique. C'est un agent de liaisonnement d'usage général non réémulsifiant
<http://www.sikacanada.com/fr/constr/cat/cr/a130.htm>

[120] **Solution: Programmes favorisant l'efficacité énergétique et la réduction au minimum des déchets**

Index : A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z Information d'affaires
par secteur Solutions environnementales canadiennes GO TO: EnviroEbiz Virtual Office
Le Bureau de la performance environnementale des entreprises canadiennes Solutio
<http://strategis.ic.gc.ca/SSGF/es32123f.html>

RESUME

La caractérisation du ciment lors de sa fabrication en usine nécessite la mesure d'un nombre important de paramètres. Nous avons retenu vingt quatre qui sont suivis quotidiennement durant deux années d'observation. La masse d'information étant conséquente, nous avons opéré une première agglomération en nous intéressant à la moyenne arithmétique mensuelle dans le but de limiter les fluctuations non intrinsèques aux observations, dues à des difficultés de gestion.

La recherche de corrélation entre ces paramètres aurait nécessité 496 croisements et leur analyse.

Il nous a paru plus judicieux d'exploiter les possibilités des méthodes d'analyse factorielle afin de limiter les croisements aux liaisons les plus pertinentes et d'extraire des relations métriques simples entre les paramètres retenus par cette analyse.

Le but de cette étude est de montrer qu'il est possible, avec un taux d'incertitude acceptable, de limiter le nombre de paramètres à surveiller d'autant que ces mesures sont relevées toutes les heures à la sortie du broyeur de clinker et à quotidiennement à l'expédition.

Mots-clé :

Composition chimique ; composition minéralogique ; broyeur ; expédition ; analyse factorielle ; corrélation ; régression .