REVUE DE STATISTIQUE APPLIQUÉE

J. L. SOULÉ
L. LE BOUFFANT

Plan statistique d'expérience appliqué à la comparaison d'appareils pour la mesure des empoussiérages

Revue de statistique appliquée, tome 1, nº 2 (1953), p. 51-64
<http://www.numdam.org/item?id=RSA_1953__1_2_51_0>

© Société française de statistique, 1953, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Revue de statistique appliquée » (http://www.sfds.asso.fr/publicat/rsa.htm) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (http://www.numdam.org/conditions). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM
Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
http://www.numdam.org/

PLAN STATISTIQUE D'EXPÉRIENCE APPLIQUÉ A LA COMPARAISON D'APPAREILS POUR LA MESURE DES EMPOUSSIÉRAGES

par

J. L. SOULÉ et L. LE BOUFFANT

Ingénieurs au Centre d'Études et Recherches des Charbonnages de France

Le Centre d'Etudes et Recherches des Charbonnages de France (C. E. R. C. H. A. R.) a entrepris de nombreuses recherches scientifiquement menées sur les multiples problèmes qui se posent dans l'exploitation des charbonnages.

MM. SOULE et LE BOUFFANT, au cours d'études systématiques sur les poussières aériennes nocives, ont appliqué les méthodes d'analyse de la variance à un problème délicat de comparaison d'appareils de mesure, compte tenu des principaux facteurs de variation qui peuvent agir sur les résultats observés.

RÉSUMÉ :

Un plan d'expériences pour la comparaison de 5 appareils de mesure des empoussiérages est décrit, ainsi que les résultats obtenus. On expose ensuite l'analyse statistique de ces résultats, qui permet de tirer des conclusions sur les rapports moyens entre les concentrations indiquées par les appareils, et sur les différences de granulométrie. Une explication des résultats, fondée essentiellement sur l'état d'agglutination des poussières atmosphériques, est proposée.

I. — INTRODUCTION.

Il existe de nombreux appareils pour déterminer la teneur en poussières d'une atmosphere ; un certain nombre d'entre eux prélèvent un échantillon qui permet, par numération au microscope, d'évaluer la concentration atmosphérique et d'établir une granulométrie ; ils sont donc directement comparables. On constate cependant, lorsqu'on utilise ces appareils concurremment, une discordance des résultats, dépassant souvent le rapport du simple au double.

Dans le cadre des recherches effectuées au Centre d'Etudes et Recherches des Charbonnages de France pour la lutte contre les poussières nocives, une comparaison systématique des appareils les plus usités a été entreprise. Une étude préliminaire globale s'est avérée nécessaire ; ultérieurement, on cherchera par des expériences plus particulières à préciser l'explication des différences trouvées.

Cette étude présentait deux caractéristiques essentielles :

1) l'impossibilité de connaître l'empoussiérage vrai dans un essai et l'absence de raison pour choisir un des appareils comme étalon conduisaient à faire une étude purement comparative ;

2) l'impossibilité de faire mesurer le même échantillon à chaque appareil et l'existence de fluctuations inévitables dans l'empoussiérage d'une atmosphère rendaient nécessaire un plan d'expériences établi avec soin et qui permette une analyse statistique des résultats.

Nous cherchons seulement à comparer les valeurs moyennes que fournissent les différents appareils en présence d'une atmosphère donnée ; les erreurs qu'ils peuvent commettre autour des moyennes sont ignorées ou plutôt confondues avec les fluctuations propres de l'atmosphère.

On est amené à considérer ainsi l'appareil comme un facteur qui superpose son effet propre à celui de la concentration réelle et à ceux des autres facteurs contrôlés, pour produire chaque résultats. L'étude expérimentale est ainsi ramenée au problème général des combinaisons de traitements, pour lequel existent divers types classiques de plans d'expérience à base statistique.

II. — DESCRIPTION DES APPAREILS COMPARÉS.

Cinq appareils furent choisis pour cette étude :

Précipitateur thermique (PT) ;
Filtre soluble (FS) ;
Midget-impinger (MI) ;
Midget-scrubber (MS) ;
Précipitateur électrostatique (PE).

1° Le précipitateur thermique retient les poussières en utilisant la force d'origine thermique qui s'exerce sur les particules au passage de l'air poussiéreux entre un fil chaud et une paroi froide. L'air passe dans l'appareil de haut en bas, le débit étant d'environ 6 cm3 par minute. Les particules précipitées sur la paroi froide sont comptées directement sous le microscope.

2° L'appareil à filtre soluble retient les poussières par filtration à travers un feutre constitué de fibres de tétrachloronaphtalène. Le prélèvement est fait horizontalement. Le filtre est ultérieurement dissous pour en séparer les particules par centrifugation. Le culot de poussières est séché puis peptisé pour le désagréger. L'observation est faite en hématimètre, sous le microscope. Le nombre de particules compté est corrigé du nombre de poussières parasites apportées par le filtre, le solvant, le peptisant et l'eau de dilution.

3° Le midget-impinger retient les poussières par percussion contre une paroi et mouillage. L'air est capté verticalement de haut en bas. Les poussières sont obtenues sous forme de suspension dans le liquide de mouillage (alcool isopropylique). L'observation est faite sur cette suspension, en hématimètre, sous le microscope.

4° Le midget-scrubber retient les poussières par mouillage. L'air est capté verticalement de haut en bas. Le mouillage est assuré par la pulvérisation dans l'air capté d'un microbrouillard de liquide mouillant (alcool isopropylique) puis par barbotage dans ce même liquide. La suspension obtenue est observée en hématimètre, sous le microscope.

5° Dans le précipitateur électrostatique, les poussières sont captées en les chargeant d'ions négatifs émis au contact d'une électrode filiforme placée sous un potentiel négatif élevé (environ 10.000 V.), et en les précipitant sur une électrode positive cylindrique. Cette électrode porte suivant une génératrice une série de capsules de microscope électronique dont la membrane de formvar a été préalablement métallisée pour la rendre conductrice. Le prélèvement a lieu horizontalement. Le dépouillement est fait au microscope électronique.

III. — CONDITIONS D'UN ESSAI.

La comparaison consistait à répéter un certain nombre de fois un essai effectué dans les conditions suivantes :

1° Dans une galerie expérimentale close (longueur 9 m. ; largeur 1,90 m. ; hauteur 2 m.) on produit de la poussière par forage à sec (au marteau perforateur) de blocs de quartzite (*) scellés au fond de la galerie. (Un circuit d'aérage permet une purge après chaque essai).

(*) Ultérieurement, la comparaison doit être reprise avec de la poussière de charbon.

L'empoussiérage est réalisé avant le prélèvement (et non en continu). Un ventilateur souffle sur le trou de forage pour réaliser la mise en suspension et la dispersion. La concentration peut être variée en jouant sur la durée du forage, ou en diluant d'air pur au moyen du circuit de purge. On effectue ensuite un brassage avec le ventilateur et on attend le retour à l'air calme pour faire le prélèvement. (D'autres séries d'expériences sont prévues avec des prélèvements en air agité ou en air s'écoulant uniformément dans des conditions se rapprochant de celles rencontrées dans la mine.)

2° Les appareils de prélèvement sont placés sur une ligne parallèle aux extrémités de la galerie à 3,5 m. du point de forage. Ils sont écartés de 25 cm. La distance des appareils extrêmes à la paroi est donc de 45 cm. Les orifices de prélèvement sont tous à 1,20 m. du sol.

Le prélèvement est fait dans le même intervalle de temps pour tous les appareils, afin de supprimer l'influence des modifications de concentration au cours du temps ; la durée choisie est un optimum moyen pour l'ensemble des appareils.

Sur l'échantillon prélevé par chaque appareil, on effectue, après une préparation appropriée, une numération et une analyse granulométrique (réduite à la coupure à 1 micron) au microscope à contraste de phase (grossissement 900) sauf pour le précipitateur électrostatique, pour lequel on utilise le microscope électronique, une coupure à 0,2 μ (limite du microscope optique) permettant la comparaison avec les autres appareils. On compte chaque fois plus de 500 particules. Chaque essai fournit ainsi 10 résultats : la concentration totale et la concentration en poussières $> 1\mu$ indiquées par chacun des 5 appareils.

IV. — PLAN D'EXPÉRIENCE.

1° **Concentrations** : 3 groupes d'essais avaient été prévus, à 3 degrés différents (ou « niveaux ») de la concentration, pour couvrir le champ des valeurs rencontrées en pratique. Dans chaque essai, l'ordre de grandeur de la concentration est, avant le prélèvement, contrôlé à l'œil dans un faisceau lumineux. Dans chaque groupe d'essais, on cherche à reproduire au mieux le même empoussiérage.

La moyenne des résultats obtenus dans chaque groupe d'essais fut :

40.000 particules/cm3 (fort empoussiérage),
8.000 particules/cm3 (moyen empoussiérage),
1.000 particules/cm3 (faible empoussiérage).

2° **Disposition des appareils.** — Etant donné les fluctuations de l'atmosphère, il fallait éviter de favoriser un appareil. D'où la nécessité de permuter les positions à chaque essai, pour le cas éventuel de positions plus empoussiérées que les autres. On a ainsi été conduit à fixer à 5 le nombre d'essais par « niveau » de concentration, de façon à faire occuper une fois chaque position par chaque appareil. Le plan d'un groupe d'essais est donc du type dit « carré latin ». Dans un but de commodité, on a choisi un type simple de carré latin, celui qui consiste à permuter circulairement de 2 rangs les appareils à chaque essai.

Par ailleurs, il fallait deux opérateurs pour les dépouillements. Chaque essai fut dépouillé entièrement par le même opérateur. Afin de pouvoir juger valablement de l'influence de l'opérateur, un partage au hasard des essais entre eux deux fut effectué.

Ainsi, outre l'appareil, les facteurs contrôlés sont : le niveau de concentration, la position du point de prélèvement et, accessoirement, l'opérateur.

V. — EXPOSÉ DES RÉSULTATS.

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux I à III (nombre de poussières par cm3) et I bis à III bis (nombre de poussières supérieures à 1 micron par cm3). Chaque ligne correspond à un essai, chaque colonne à une position. Dans le coin de chaque case, l'appareil est indiqué par ses initiales. Pour la commodité de la lecture, les essais ont chaque fois été regroupés dans un ordre tel que le précipitateur électrostatique occupe la diagonale principale du carré.

NOTA. — Les tableaux des fortes et moyennes concentrations contiennent une case vide relative au précipitateur électrostatique. La raison en est que le générateur de tension a dû subir une réparation avant la fin de la série d'essais. Il a été remarqué que les concentrations trouvées devenaient systématiquement plus fortes (parce que la tension était trop faible auparavant). Aussi les derniers résultats furent-ils supprimés pour ne pas introduire une cause de dispersion supplémentaire.

VI. — ANALYSE DE LA « VARIANCE » DES RÉSULTATS.

L'analyse statistique consiste tout d'abord à déterminer si les différences observées sont significatives de différences réelles, malgré l'imprécision due aux fluctuations fortuites.

Cette analyse a été faite selon le schéma classique de « l'analyse de la variance » pour un carré latin.

1° Pour faire une comparaison valable (ou « correcte ») des 5 appareils dans un carré complet de 25 résultats (en éliminant à la fois les variations de concentration réelle moyenne d'un essai à l'autre et les effets systématiques de position), on a fait cette comparaison sur la moyenne des 5 résultats fournis par chaque appareil.

Comme il était logique de supposer que le changement de concentration ou de position a un même effet multiplicatif plutôt qu'additif sur les résultats, il était préférable de considérer des moyennes géométriques plutôt qu'arithmétiques (les calculs ont donc été faits sur les logarithmes des résultats).

Dans les cas où il manquait un résultat, on a utilisé le calcul donné par Yates, qui permet la comparaison « correcte » optimum (la méthode revient à calculer un résultat fictif pour compléter le tableau). On a pu ainsi porter sur les 6 tableaux les moyennes géométriques par appareil.

2° La précision de ces moyennes, permettant de savoir dans quelle mesure les différences trouvées ne sont pas fortuites mais « significatives » de différences systématiques, a été évaluée à partir des résultats eux-mêmes, selon les principes de l'analyse statistique.

Tout d'abord « l'erreur-type » sur les résultats individuels a été estimée à partir des « écarts-résiduels » entre chacun des résultats et la valeur théorique correspondante (obtenue en corrigeant la moyenne d'appareil par l'effet moyen de concentration et l'effet moyen de position).

Les calculs sont faits sur les logarithmes, ce qui est satisfaisant du point de vue des erreurs qui peuvent être ici supposées homogènes en valeur relative.

Les moyennes par appareil, calculées sur 5 résultats, ont une erreur-type $\sqrt{5}$ fois plus petite que les résultats individuels ; on en a donc une estimation d'après le calcul précédent. Pour savoir si les moyennes par appareil sont significativement différentes (dans leur ensemble) leur écart-type effectif a été comparé à leur erreur-type commune, en se référant aux tables de Snedecor (qui indiquent les rapports de variances significatifs).

On se reportera aux ouvrages pour le détail de la conduite des calculs (*).

3° L'analyse de la variance a été faite pour chaque carré latin et portée dans chaque tableau.

Elle montre :

— qu'il y a, dans chaque cas, des différences significatives entre appareils ;

— qu'il n'y a pas d'effet significatif de la position ;

— qu'il y a, dans certains cas, une variation significative entre les essais.

On constate, par ailleurs, que l'erreur-type est homogène aux différents niveaux de concentration (on peut même tester que les estimations obtenues aux trois niveaux ne sont pas significativement différentes). Ceci nous a incité à faire une analyse globale des 15 essais.

4° Cette analyse globale est donnée dans les tableaux A et B. Elle consiste d'abord à regrouper les « fluctuations » (sommes des carrés) relatives aux essais, aux positions, aux appareils et aux erreurs.

L'estimation globale de la variance de l'erreur, traduite en nombre vrai, indique que l'erreur-type sur la moyenne géométrique de 5 résultats est sensiblement égale à 25 %.

(*) Voir en particulier : Vessereau, Méthodes statistiques en biologie et en agronomie, Baillière, Paris, 1948. Cochran and Cox, Experimental designs, John Wiley, New-York, 1950.

La variance relative aux essais est plus importante pour le nombre de poussières plus grandes qu'un micron. On trouve, en fait, qu'il n'y a pas de différence significative entre opérateurs pour le nombre total, mais qu'il y en a pour le nombre de poussières plus grandes que le micron.

5° La variance relative aux appareils a été, en vue de l'interprétation, décomposée de la façon suivante : en comparant les moyennes générales par appareil, on obtient l' « effet principal » ; en comparant les différences entre les valeurs obtenues aux niveaux I et III, c'est-à-dire les croissances des valeurs fournies par les 5 appareils, on obtient « l'interaction linéaire (de l'effet d'appareil) avec le niveau » ; enfin, les différences de courbure des lois de croissance constituent « l'interaction quadratique ». Les décompositions obtenues sont portées sur les tableaux A et B.

Dans les deux cas, la dernière composante a un effet non significatif. Les autres composantes ont des effets significatifs à des degrés différents.

VII. — ESTIMATION DES DIFFÉRENCES.

1) L'analyse de la variance a établi quelles caractéristiques présentaient des différences significatives. Il reste à rechercher à quels appareils elles sont imputables et à compléter l'estimation des différences par des « limites de confiance ». Les valeurs de ces différences sont groupées dans le tableau ci-dessous :

		PT	FS	MI	MS	PE
Nombre Total	Différence à la moyenne générale	−0,2933	0,0706	0,1142	0,1228	−0,0143
	Interaction linéaire	−0,1193	−0,2850	0,1182	0,2878	−0,0017
Nombre > 1 μ	Différence à la moyenne générale	−0,1719	0,0512	0,1239	0,1114	−0,1146
	Interaction linéaire	0,0848	−0,4880	0,0958	0,3406	−0,0332

Ces nombres sont des logarithmes ; leur somme par ligne est nulle puisqu'il s'agit de comparaisons. Par exemple, la première valeur −0,2933, logarithme de 0,509, indique que la moyenne géométrique des 15 résultats du précipitateur thermique est 0,509 fois la moyenne des résultats des 5 appareils ; la valeur — 0,1193, logarithme de 0,760, signifie que le rapport entre les moyennes du PT aux niveaux I et III est 0,760 fois le rapport moyen des 5 appareils.

2) A partir de l'erreur-type σ, on peut calculer la précision d'une différence entre deux appareils (le σ vrai n'est pas connu, on n'en possède qu'une estimation. Les intervalles de confiance ont donc été calculés avec la table du t de Student). On trouve ainsi, pour chacune des 4 lignes, l'erreur maximum suivante sur la différence entre deux appareils (avec un « risque » de 5 %) : 0,165 ; 0,404 ; 0,154 ; 0,376.

On voit par là que le classement trouvé peut présenter certaines interversions fortuites. (Avec le précipitateur électrostatique, il faut augmenter légèrement la marge d'incertitude, à cause des résultats manquants.)

3) Pratiquement, les conclusions qu'on peut tirer d'une telle analyse sont les suivantes :

a) le précipitateur thermique donne en moyenne (dans les conditions des essais) un nombre total moindre que chacun des autres appareils. Par rapport à la moyenne des 4 autres, il a donné 2,3 fois moins ; il y a 95 chances sur cent pour que le rapport vrai soit compris entre 1,7 et 3,1 ;

b) Le nombre total fourni a crû avec la concentration vraie de plus en plus vite pour les appareils classés dans l'ordre suivant : FS, PT, PE, MI, MS. Mais l'ordre ne peut guère être garanti que pour FS et MI, FS et MS, PT et MS ;

c) Pour le nombre moyen de particules supérieures au micron, les appareils se classent en deux catégories absolument distinctes : PT et PE d'un côté, FS, MI, MS de l'autre. Le rapport moyen d'un groupe à l'autre a été de 1,7 ; le rapport vrai a 95 chances sur cent d'être compris entre 1,4 et 2,2.

d) Pour la croissance du nombre ($> 1\mu$), les écarts sont accentués par rapport à la croissance du nombre total ; en particulier, la croissance avec le filtre soluble est significativement moins grande qu'avec tout autre appareil ;

e) Comparer ce qui se passe pour le nombre total et pour le nombre ($> 1\mu$) revient à comparer les pourcentages de poussières plus grandes qu'un micron. Il y a intérêt pour cela à refaire une analyse directe de ce pourcentage en calculant son erreur propre. Nous n'avons pas rapporté ce calcul qui montre qu'en moyenne on a un pourcentage significativement plus grand au PT qu'avec les autres appareils , plus faible au PE ; que le pourcentage en moyenne ne se modifie pas significativement d'un niveau à l'autre, mais cependant qu'il croît significativement avec la concentration au PT, qu'il décroît significativement au FS.

VIII. — INTERPRÉTATION TECHNIQUE DES CONCLUSIONS.

Des raisons vraisemblables, appuyées sur d'autres expériences, peuvent expliquer techniquement ces conclusions ; une étude ultérieure permettra de les contrôler.

1) L'existence d'agglomérats dans l'air, dissociés au cours de la préparation des échantillons dans le FS, le MI, le MS, alors qu'ils sont respectés (et visibles) dans le précipitateur thermique et (au moins partiellement) dans le précipitateur électrostatique, peut expliquer les différences importantes trouvées en moyenne entre ces deux groupes d'appareils.

Comme la proportion d'agglomérats augmente avec la concentration, on comprend pourquoi au MI et au MS les nombres croissent plus vite qu'avec les autres appareils. Et comme les agglomérats se font surtout au détriment des fines, on s'explique que le pourcentage $> 1\mu$ soit plus grand au précipitateur thermique, et croisse avec la concentration.

2) Une coupure trop basse ($0{,}2\mu$) au microscope électronique pour le raccord avec le microscope optique expliquerait que le nombre total au PE soit plus grand qu'au PT (alors que le nombre ($> 1\mu$) est analogue) ; ceci expliquerait en même temps le pourcentage plus faible. Mais on peut se demander si une dissociation partielle des agglomérats par la répulsion électrostatique des particules chargées n'intervient pas aussi. De plus, l'appareil a fonctionné dans des conditions défectueuses.

3) La croissance plus lente du nombre total et surtout du nombre ($> 1\mu$) au filtre soluble (et la décroissance du pourcentage) peuvent être dues aux impuretés parasites, susceptibles de fausser les résultats aux faibles empoussiérages malgré la correction effectuée pour en tenir compte ; les résultats indiqueraient que les impuretés sont plus grosses que les poussières. Notons que le temps de prélèvement défavorisait le filtre soluble à ce point de vue.

4) On a expliqué ainsi qualitativement toutes les différences sans faire appel à des rendements de captation différents. Ceci ne veut évidemment pas dire que ce facteur n'intervienne pas.

Les conclusions qu'on peut tirer de ces expériences au point de vue de l'utilisation des divers appareils ne peuvent pas être définitives avant que d'autres séries de comparaisons dans d'autres conditions aient été effectuées. On peut dire cependant, d'une façon générale, que les différences importantes constatées entre les appareils qui respectent les agglomérats et ceux qui les dissocient rendent difficilement comparables les mesures fournies par ces deux sortes d'appareils ; un étalonnage réciproque reste problématique car l'état d'agglomération, pour une même nature de poussière, dépend de la concentration et, probablement, du passé de la poussière ; de plus, il modifie la granulométrie. Ceci pose la question de savoir quelle est la mesure la plus adaptée au but poursuivi.

TABLEAU I

Fort empoussiérage

Nombre total par cm3 d'air

					Moyenne géométrique par essai
PE 57.780	MS 67.000	PT 25.878	FS 76.500	MI 66.666	55.210
MI 36.900	PE 17.130	MS 87.872	PT 11.669	FS 6.531	21.140
FS 68.666	MI 78.897	PE 85.175	MS 64.539	PT 14.980	53.710
PT 15.320	FS 23.250	MI 36.613	PE 16.896	MS 72.250	27.550
MS 69.401	PT 18.084	FS 74.688	MI 84.126	PE	46.780
Moyenne géométrique par position 43.460	32.810	55.590	38.290	26.670	38.200 Moyenne générale

Moyenne géométrique par appareil

PT	FS	MI	MS	PE
16.560	35.900	56.890	71.780	33.270

Analyse de la variance (des logarithmes)

Facteur de variation	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen
Essai (ligne) . .	4	0,7054	0,1763
Position (colonne)	4	0,2925	0,0731
Appareil	4	1,2043	0,3011
Erreur	11	0,4729	0,0430
TOTAL	23	2,6751	

TABLEAU II

Moyen empoussiérage

Nombre total par cm3 d'air

					Moyenne géométrique par essai
PE 11.700	MS 7.250	PT 6.556	FS 11.750	MI 12.173	9.550
MI 10.064	PE 15.469	MS 7.500	PT 4.459	FS 9.083	8.610
FS 4.908	MI 8.953	PE	MS 6.113	PT 3.939	5.821
PT 3.367	FS 14.050	MI 18.670	PE 5.760	MS 14.033	9.333
MS 21.679	PT 3.151	FS 3.208	MI 5.242	PE 10.542	6.561
Moyenne géométrique par position 8.414	8.492	7.145	6.267	9.163	7.816 Moyenne générale

Moyenne géométrique par appareil

PT	FS	MI	MS	PE
4.140	7.499	10.140	10.000	9.290

Analyse de la variance (des logarithmes)

Facteur de variation	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen
Essai (ligne) . . .	4	0,1880	0,0470
Position (colonne)	4	0,0890	0,02225
Appareil	4	0,5323	0,1331
Erreur	11	0,5863	0,0533
TOTAL	23	1,3956	

TABLEAU III

Faible empoussiérage

Nombre total par cm3 d'air

					Moyenne géométrique par essai
PE 1.817	MS 827	PT 698	FS 1.684	MI 1.161	1.154
MI 1.029	PE 530	MS 914	PT 533	FS 1.847	867
FS 1.331	MI 2.522	PE 1.300	MS 3.350	PT 1.045	1.726
PT 289	FS 2.968	MI 1.041	PE 379	MS 566	718
MS 713	PT 653	FS 1.925	MI 724	PE 1.294	962
Moyenne géométrique par position 875	1.165	1.107	962	1.104	1.036 Moyenne générale

Moyenne géométrique par appareil

PT	FS	MI	MS	PE
592	1.880	1.178	1.005	908

Analyse de la variance (des logarithmes)

Facteur de variation	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen
Essai (ligne) . . .	4	0,41717	0,10429
Position (colonne)	4	0,05300	0,01325
Appareil	4	0,66187	0,16547
Erreur	12	0,62572	0,05214
TOTAL	24	1,75776	

TABLEAU I bis

Fort empoussiérage

Nombre > 1 μ par cm3 d'air

					Moyenne géométrique par essai
PE 14.868	MS 14.941	PT 12.317	FS 14.152	MI 11.265	13.400
MI 33.960	PE 5.362	MS 37.614	PT 7.620	FS 2.468	10.520
FS 39.552	MI 49.390	PE 26.735	MS 44.275	PT 10.741	30.130
PT 7.951	FS 4.650	MI 10.252	PE 4.502	MS 17.918	7.871
MS 22.000	PT 7.757	FS 9.035	MI 15.480	PE	9.594
Moyenne géométrique par position 20.330	10.720	16.260	12.710	7.113	12.630 Moyenne générale

Moyenne géométrique par appareil

PT	FS	MI	MS	PE
9.079	8.954	19.730	25.010	7.999

Analyse de la variance (des logarithmes)

Facteur de variation	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen
Essai (ligne). . .	4	1,0287	0,2572
Position (colonne)	4	0,6099	0,1525
Appareil	4	1,0368	0,2592
Erreurs	11	0,3554	0,0323
TOTAL	23	3,0308	

TABLEAU II bis

Moyen empoussiérage

Nombre > 1 μ par cm3 d'air

					Moyenne géométrique par essai
PE 4.154	MS 2.640	PT 2.734	FS 3.734	MI 3.748	3.297
MI 1.971	PE 5.005	MS 1.649	PT 1.819	FS 1.997	2.260
FS 1.822	MI 2.659	PE	MS 2.378	PT 2.360	2.276
PT 2.162	FS 8.458	MI 12.192	PE 2.191	MS 7.396	5.153
MS 8.975	PT 2.040	FS 1.668	MI 2.861	PE 3.255	3.084
Moyenne géométrique par position 3.105	3.590	2.904	2.484	3.350	3.062 Moyenne générale

Moyenne géométrique par appareil

PT	FS	MI	MS	PE
2.193	2.819	3.690	3.690	3.199

Analyse de la variance (des logarithmes)

Facteur de variation	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen
Essai (ligne). . .	4	0,4291	0,1073
Position (colonne)	4	0,0758	0,0189
Appareils	4	0,1791	0,0448
Erreurs	11	0,7563	0,0687
TOTAL	23	1,4403	

TABLEAU III bis

Faible empoussiérage

Nombre > 1 μ par cm3 d'air

					Moyenne géométrique par essai
PE 261	MS 267	PT 275	FS 426	MI 273	294
MI 551	PE 187	MS 380	PT 203	FS 1.202	394
FS 789	MI 1.042	PE 437	MS 814	PT 483	675
PT 103	FS 1.053	MI 487	PE 130	MS 204	269
MS 230	PT 168	FS 745	MI 258	PE 347	303
Moyenne géométrique par position 306	391	440	329	407	363 Moyenne générale

Moyenne géométrique par appareil

PT	FS	MI	MS	PE
215	794	455	329	249

Analyse de la variance (des logarithmes)

Facteur de variation	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen
Essai (ligne) . . .	4	0,5273	0,1318
Position (colonne)	4	0,1170	0,0292
Appareils	4	1,0267	0,2567
Erreurs	12	0,3834	0,03195
TOTAL	24	0,0544	

TABLEAU A

Analyse du nombre total de poussières

(sur l'ensemble des essais)

Analyse globale de la variance

Facteur de variation	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	F	Risque
Essai (ligne)	12	1,3106	0,1092	2,20	Entre 5 % et 1 %
Position (colonne)	12	0,4345	0,0362	0,73	
Appareil	12	2,3985	0,1999	4,03	< 1 %
Erreur	34	1,6849	0,04955		
TOTAL	70	5,8285			

Décomposition de la variance relative aux appareils

Composante	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	F	Risque
Effet principal	4	1,7912	0,4478	9,04	< 1 %
Interaction linéaire avec le « niveau »	4	0,4818	0,1204	2,43	entre 10% et 5%
Interaction quadratique	4	0,1255	0,0314	0,63	
TOTAL	12	2,3985			

TABLEAU B

Analyse du nombre de poussières plus grandes qu'un micron

Analyse globale de la variance

Facteur de variation	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	F	Risque
Essai (ligne)	12	1,9851	0,1654	3,76	< 1 %
Position (colonne)	12	0,8027	0,0669	1,52	> 10 %
Appareil	12	2,2426	0,1870	4,25	< 1 %
Erreur	34	1,4951	0,04397		
TOTAL	70	6,5255			

Décomposition de la variance relative aux appareils

Composante	Degrés de de liberté	Somme des des carrés	Carré moyen	F	Risque
Effet principal	4	1,0962	0,2740	6,23	< 1 %
Interaction linéaire avec le « niveau »	4	0,9292	0,2323	5,28	< 1 %
Interaction quadratique	4	0,2172	0,0543	1,23	> 10 %
TOTAL	12	2,2426			