

PLAN DE SIMULATION

I. 1. Nombre de simulations	
I. 2. Plan de simulation.....	
I.2.1 Présentation des 2560 simulations	
I.2.2 Plan d'expériences	

I. 1. Nombre de simulations

Pour élaborer le plan de simulation, nous agissons sur trois données d'entrée : la localisation, l'efficacité et le type de produits. La combinaison de quatre localisations (l, r, c, g), quatre efficacités (A, B, C, D) dans une chaîne logistique de trois acteurs donnent un total de 4096 simulations par quatre types de produits soit 16 384 au total. Nous choisissons de garder les quatre produits¹¹ et les 64 combinaisons des quatre localisations¹² (figure 54).

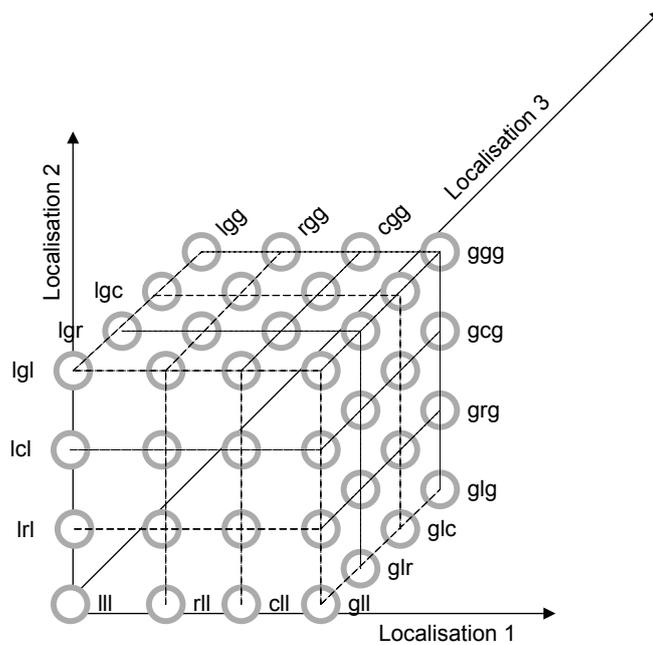


Figure 54 : 64 configurations de localisation

Mais, nous limitons les possibilités concernant les efficacités. Après essais, il nous est apparu, comme nous le verrons dans la partie ci-après, que les classes A et B se comportaient de manière presque similaire ainsi que les classes C et D. Ainsi, nous gardons les combinaisons ayant les caractéristiques suivantes :

- homogénéité : AAA, BBB, CCC, DDD,
- dégradation de l'efficacité : AAD, ADA, DAA, DDA, DAD, ADD

Soit 10 combinaisons possibles.

Nous simulons donc l'ensemble des 640 simulations correspondantes pour chacun des quatre produits soit 2560 simulations.

¹¹ rappel : produit 1: léger/non encombrant, produit 2 : lourd/non encombrant, produit 3 : léger/encombrant, produit 4 : lourd/encombrant

¹² rappel : local=l, régional=r, continental=c, global=g

I. 2. Plan de simulation

I.2.1 Présentation des 2560 simulations

Nous traitons ces 2560 simulations par une analyse en composantes multiples sur quatre critères : deux financiers et deux environnementaux. Les deux critères financiers sont le nombre de produits stockés et le nombre de kilomètres parcourus. Les deux critères environnementaux sont les émissions dues au transport et au stockage. L'analyse en composantes principales a pour objectif de décrire l'ensemble des données par de nouvelles variables en nombre réduit. Ces nouvelles variables sont des combinaisons linéaires des variables originales, et portent le nom de Composantes Principales (CP). Nous projetons ces données sur des plans factoriels, chaque plan étant défini par une paire de Composantes Principales prise parmi les premières CP. Nous traiterons les simulations avec les logiciels Sphinx et Xlstat.

Les deux axes sont définis comme suit :

	Axe 1 (+40.82%)		Axe 2 (+34.18%)	
CONTRIBUTIONS POSITIVES	émission dues au stockage	+49.0%	nombre de km	+47.0%
	émissions dues au transport	+44.0%	nombre de produits stockés	+45.0%
CONTRIBUTIONS NEGATIVES	nombre de km	-2.0%		
	nombre de produits stockés	-2.0%		

Tableau 25 : Contributions aux axes

Ainsi, l'axe 1 représente les critères environnementaux et l'axe 2 les critères financiers. Les 2560 configurations sont réparties de la manière suivante :

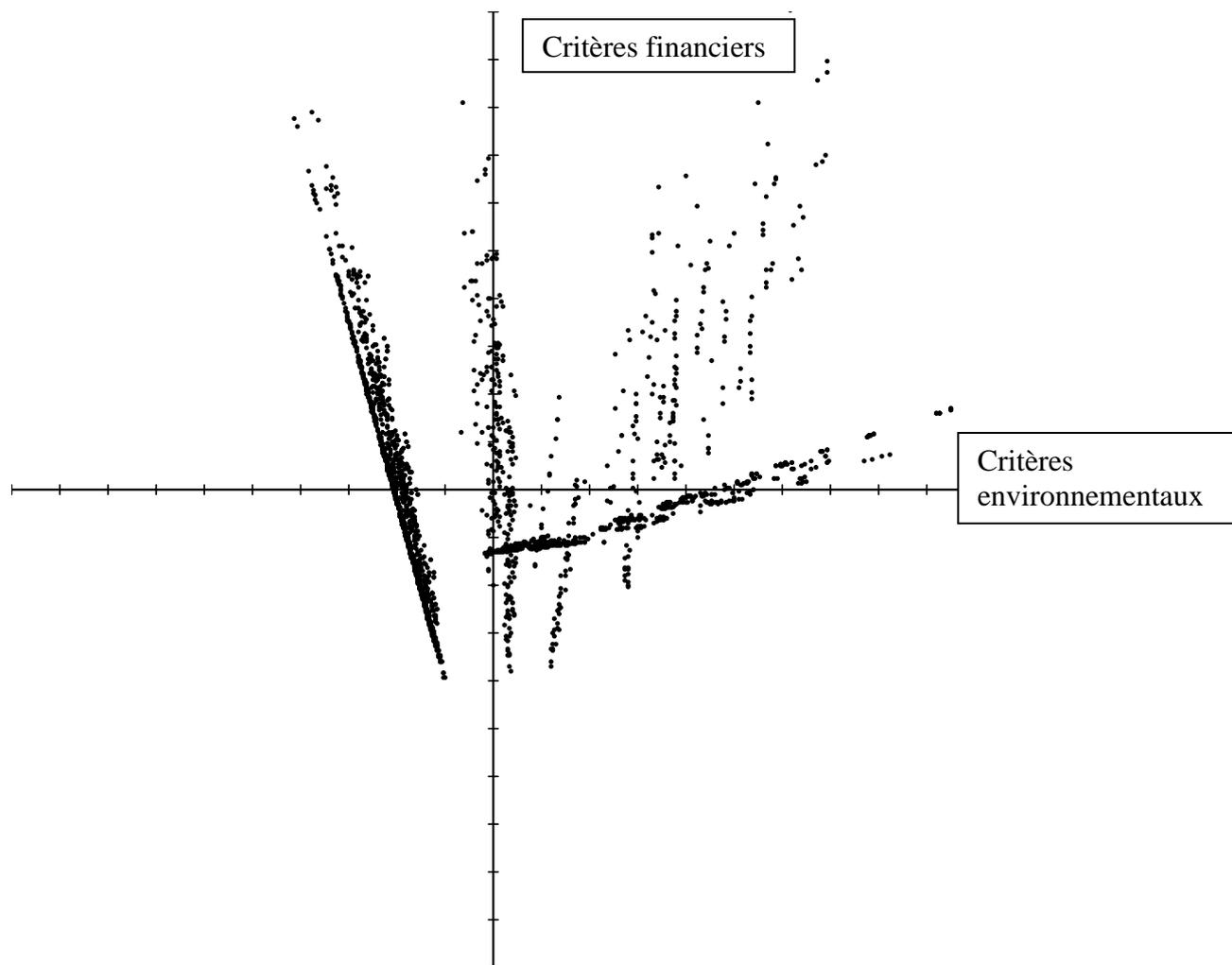


Figure 55 : Représentation des 2560 configurations

Le nombre de configurations est très important et la figure 55 montre que certaines configurations semblent se regrouper. Mais aux vues du nombre de simulations et paramètres à prendre en compte, nous avons décidé de les traiter progressivement en définissant un plan d'expériences. Nous allons à présent présenter ce plan.

I.2.2 Plan d'expériences

Nous étudions les 2560 configurations de manière progressive. Nous nous intéressons tout d'abord aux configurations homogènes tant au niveau de leur localisation qu'au niveau de l'efficacité de la chaîne logistique. Ensuite, nous analysons les conséquences d'une dégradation de la localisation puis celles d'une dégradation de l'efficacité. Enfin, nous examinerons les configurations à localisation quelconque. Notre plan d'expériences est le suivant :

configurations homogènes

- les 16 configurations III à efficacité homogène pour les quatre produits,
- les 32 configurations III et rrr à efficacité homogène pour les quatre produits,
- les 64 configurations à localisation et efficacité homogènes pour les quatre produits,

configurations à localisation dégradée

- les 22 configurations AAA à localisation dégradée pour un produit,
- les 88 configurations AAA à localisation dégradée pour quatre produits,
- les 352 configurations à localisation dégradée, efficacité homogène pour les quatre produits.

configurations à efficacité dégradée

- les 8 configurations III à efficacité dégradée pour un produit,
- les 32 configurations III à efficacité dégradée pour quatre produits,
- les 160 configurations à localisation homogène, efficacité dégradée pour quatre produits,

autres configurations

- les 64 configurations AAA à localisation quelconque pour un produit
- les 128 configurations à efficacité homogène en A et D, à localisation quelconque pour un produit
- les 512 configurations à efficacité homogène en A et D, localisation quelconque pour les quatre produits

Chapitre II LES CONFIGURATIONS HOMOGENES

II. 1. Efficacité homogène, une seule localisation, quatre produits.....	
II.1.1 Analyse de la variance	
II. 2. Efficacité homogène, localisation III-rrr, quatre produits.....	
II. 3. Efficacité homogène, localisation homogène, quatre produits.....	

II. 1. Efficacité homogène, une seule localisation, quatre produits

Afin d'évaluer l'influence des efficacités et des produits, nous avons effectué 16 simulations avec une seule localisation III. Elles sont listées dans le tableau 26 :

produit 1	produit 2	produit 3	produit 4
<ul style="list-style-type: none"> •AAA •BBB •CCC •DDD 	<ul style="list-style-type: none"> •AAA •BBB •CCC •DDD 	<ul style="list-style-type: none"> •AAA •BBB •CCC •DDD 	<ul style="list-style-type: none"> •AAA •BBB •CCC •DDD

Tableau 26 : 16 simulations à localisation constante

Les résultats de la classification par la méthode des centres mobiles sont donnés au tableau 27 et à la figure 55 selon :

- les émissions dues au stockage en tonnes équivalent CO₂
- les émissions dues au transport en tonnes équivalent CO₂.

Cette méthode partitionne des individus en classes homogènes, sur la base de leur description par un ensemble de variables quantitatives. Nous nous donnons une partition de départ et chaque classe est représentée par son centre de gravité. Nous construisons alors une nouvelle partition en affectant chaque point au plus proche des centres précédents, et nous itérons le procédé...

CLASSIFICATION	en tonne équivalent CO ₂	
	émission dues au stockage	émissions dues au transport
PRODUIT 2	0,01	0,00
PRODUIT 4 CCC+DDD	2952,84	330,33
PRODUIT 3 + PRODUIT 4 (AAA+BBB)	1812,30	95,00
PRODUIT 1	23,39	22,50

Tableau 27 : Résultats des 16 simulations à localisation constante et efficacité homogène en tonne équivalent CO₂

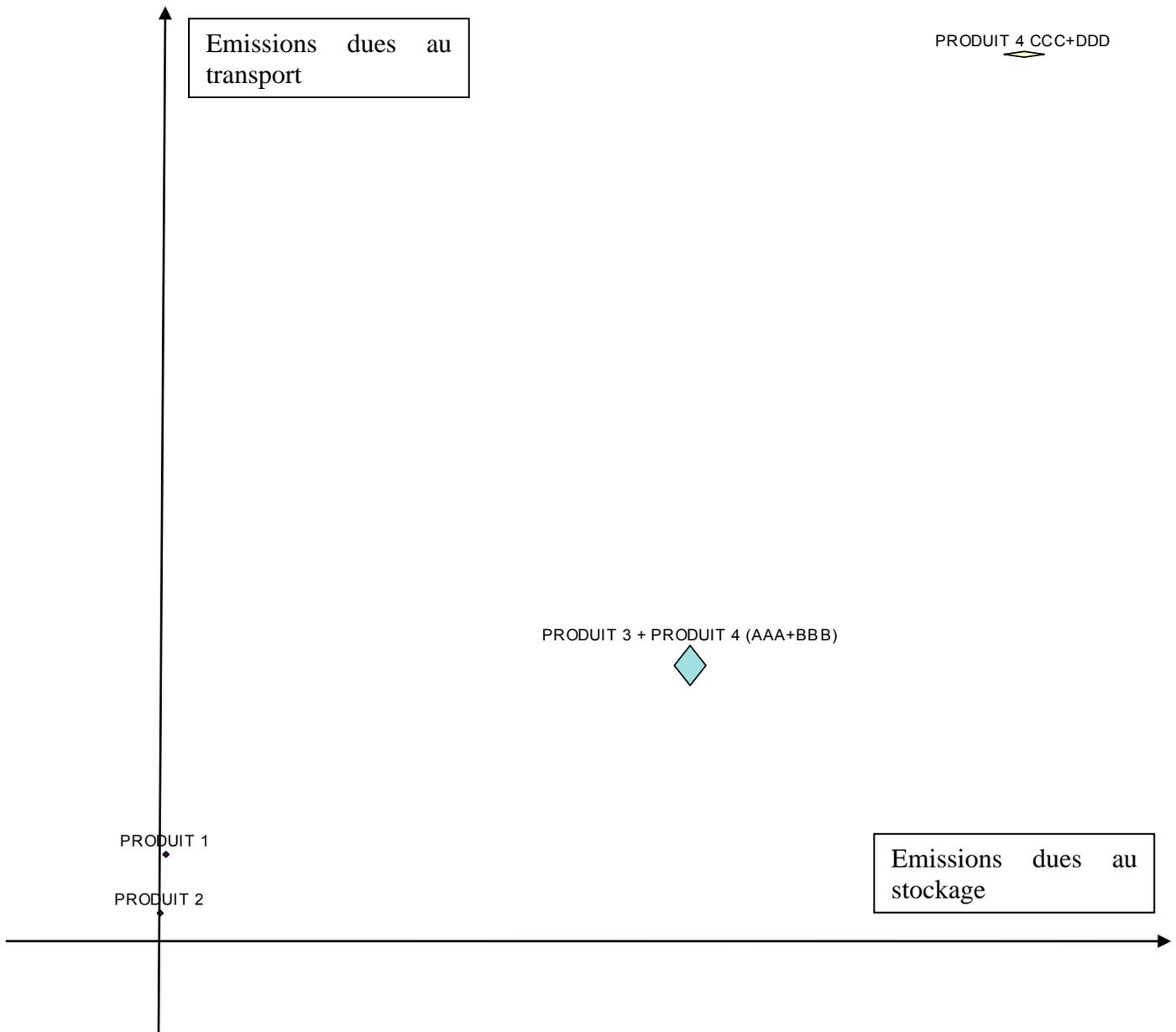


Figure 56 : Classification par la méthode des centres mobiles des 16 configurations selon les émissions

La surface des losanges est proportionnelle aux écarts-types.

D'après le tableau 27 et la figure 56, comme attendu, le type de produit est influent. Le produit 2 est moins lourd que le produit 1 donc il émet moins durant le transport.

Les résultats pour le produit 4 diffèrent selon le choix de l'efficacité. Ils sont équivalents à ceux du produit 3 si les configurations d'efficacité sont AAA et BBB. De même, les deux configurations CCC et DDD se situent dans la même classe. Il est donc intéressant de se poser la question de la pertinence de garder les quatre efficacités lors de la dégradation de celle-ci. Nous pourrions garder uniquement AAA (pour des résultats AAA et BBB) et DDD (pour des résultats CCC et DDD). Nous le confirmerons en analysant d'autres résultats de simulations.

II.1.1 Analyse de la variance

L'analyse de la variance ou ANOVA (ANalysis Of VAriance) est un test statistique permettant de valider ou d'invalider une hypothèse avec un facteur. En réalisant une analyse de la variance sur le type de produits sur les 2560 configurations, nous confirmons l'importance du type de produits. Les critères évalués sont : émissions dues au stockage, émissions dues au transport, nombre de kilomètres, nombre de produits stockés.

type de produit	émissions dues au stockage	émissions dues au transport	nombre de km	nombre de produits stockés
1	26.13	2952.50	29210818.61	2025.33
2	0.01	0.00	29210818.61	2025.33
3	1921.94	4683.49	22641476.72	1910.29
4	3083.98	41554.08	22641476.72	1910.29
TOTAL	1258.01	12297.52	25926147.66	1967.81

Tableau 28 : Résultats de l'ANOVA sur le type de produits avec 2560 configurations

Le tableau 28 confirme que les émissions sont très différentes selon le type de produits. Les nombres moyens de kilomètres et de produits stockés sont quasi constants car ils ne dépendent pas du type de produits.

II. 2. Efficacité homogène, localisation III-rrr, quatre produits

Nous élargissons les configurations précédentes à la localisation rrr et nous considérons les deux paramètres suivants pour l'analyse par la méthode des centres mobiles : émissions dues au transport et au stockage. Nous obtenons alors les résultats du tableau 29 et de la figure 57:

CLASSIFICATION	en tonne équivalent CO ₂	
	émission dues au stockage	émissions dues au transport
produit 4 III CCC+DDD	3174,41	333,50
produit 4 rrr	2946,04	1771,00
produit 4 III AAA+BBB et produit 3 rrr CCC+DDD	2201,87	215,40
produits 1 et 2	12,09	36,13
produit 3 III + rrr AAA+BBB	1581,04	97,20

Tableau 29 : Résultats des 32 simulations a localisations LLL et RRR en tonne équivalent co₂

On remarque encore l'importance de l'efficacité pour les produits 3 et 4. Ces résultats nous confirment la similitude des résultats pour les configurations AAA et BBB, CCC et DDD.

Les produits 1 et 2 se situent dans la même classe. Leurs émissions sont faibles par rapport aux deux autres produits (tableau 29).

La figure 57 illustre ces résultats.

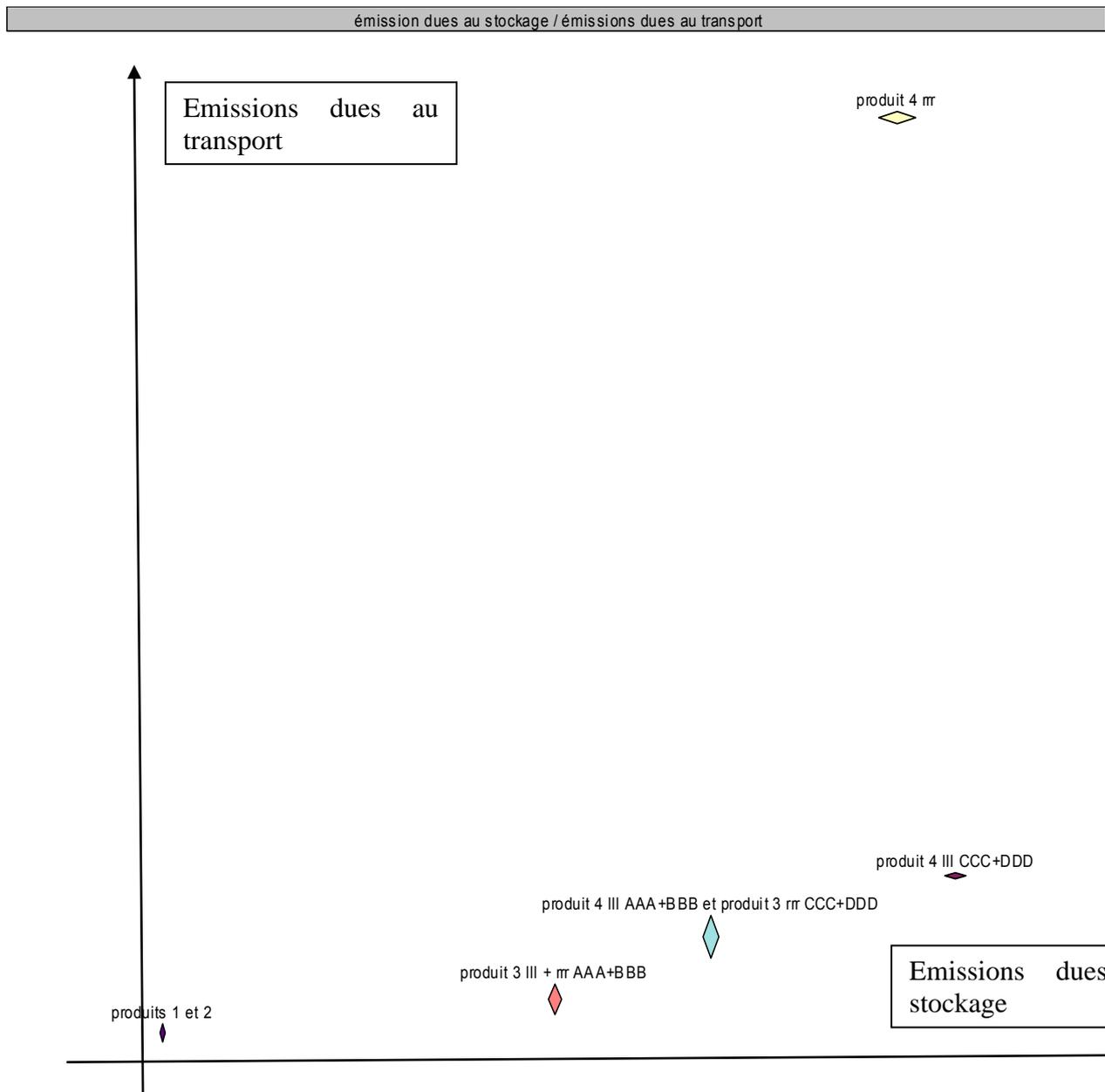


Figure 57 : Classification par la méthode des centres mobiles des 32 configurations

La surface des losanges est proportionnelle aux écarts-types. L'axe vertical représente les émissions dues au transport et l'axe horizontal celle dues au stockage.

Pour approfondir ces résultats, nous réalisons une analyse en composantes principales avec quatre critères :

- critères environnementaux : émissions dues au transport et au stockage,
- critères financiers : nombre de kilomètres parcourus, nombre de produits stockés.

La variance est expliquée par les composantes suivantes :

	f1	f2	f3	f4
Valeur propre	2,035	0,999	0,802	0,165
% expliqué	45.75%	26.36%	21.79%	6.10%
% cumulé	45.75%	72.11%	93.90%	100,00%

Tableau 30 : Variance expliquée pour les 32 configurations

D'après le critère de niveau d'informations et de Kaiser, nous retiendrions les deux premières valeurs propres car elles représentent 76% de l'information et sont supérieures ou égales à un. Mais, si nous effectuons un scree test (figure 58), la rupture de pente se situe après la deuxième valeur propre. Nous gardons donc les deux premières valeurs propres et analysons la carte factorielle correspondante.

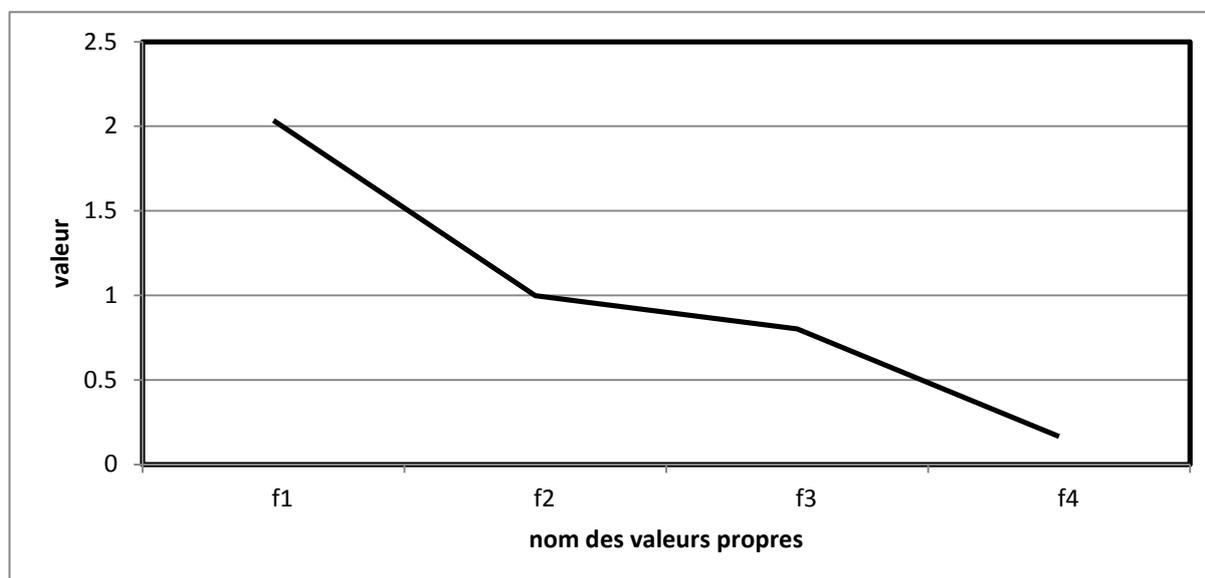


Figure 58 : Représentation des valeurs propres

Les contributions aux deux axes sont alors les suivantes (tableau 31) :

	Axe 1 (+45.75%)		Axe 2 (+26.36%)	
CONTRIBUTIONS POSITIVES	émissions dues au transport	+43,0%	nombre de produits stockés	+42,0%
	émissions dues au stockage	+34,0%	nombre de km	+33,0%
CONTRIBUTIONS NEGATIVES			émissions dues au stockage	-18,0%
			émissions dues au transport	-4,0%

Tableau 31 : Contributions aux deux axes

Le premier axe représente donc les émissions d'équivalent CO₂ et contient 45.75% des informations. Nous pourrions le nommer "émissions d'équivalent CO₂". Les émissions sont en effet moins bien représentées sur l'autre axe. Le second axe symbolise les facteurs financiers car les contributions négatives n'ont pas un pourcentage assez élevé pour être significatives. La représentation des deux axes donne les résultats illustrés par la figure 59 et le tableau 32 :

Evaluation des impacts simultanés de la localisation, de l'efficacité et du type de produits fabriqués sur les performances environnementales et financières d'une chaîne logistique

en tonne équivalent CO₂

CLASSIFICATION	émission dues au stockage	émissions dues au transport	nombre de km	nombre de produits stockés
CCC rrr	1278,35	530,00	5783700,00	2058,00
AAA III	889,95	98,00	565370,00	1433,00
AAA+DDD rrr 1+2+3	626,26	104,33	5690800,00	1953,50
BBB rrr	1101,85	511,25	5577900,00	1774,00
DDD III 3+4	2755,94	183,00	561030,00	2230,00
CCC III	1204,57	98,75	570430,00	1939,00
DDD+AAA rrr 4	2974,51	1772,50	5690800,00	1953,50
DDD III 1+2	14,39	11,00	561030,00	2230,00
BBB III	1023,72	95,25	550010,00	1648,00

Tableau 32 : Classification des 32 configurations par ACP

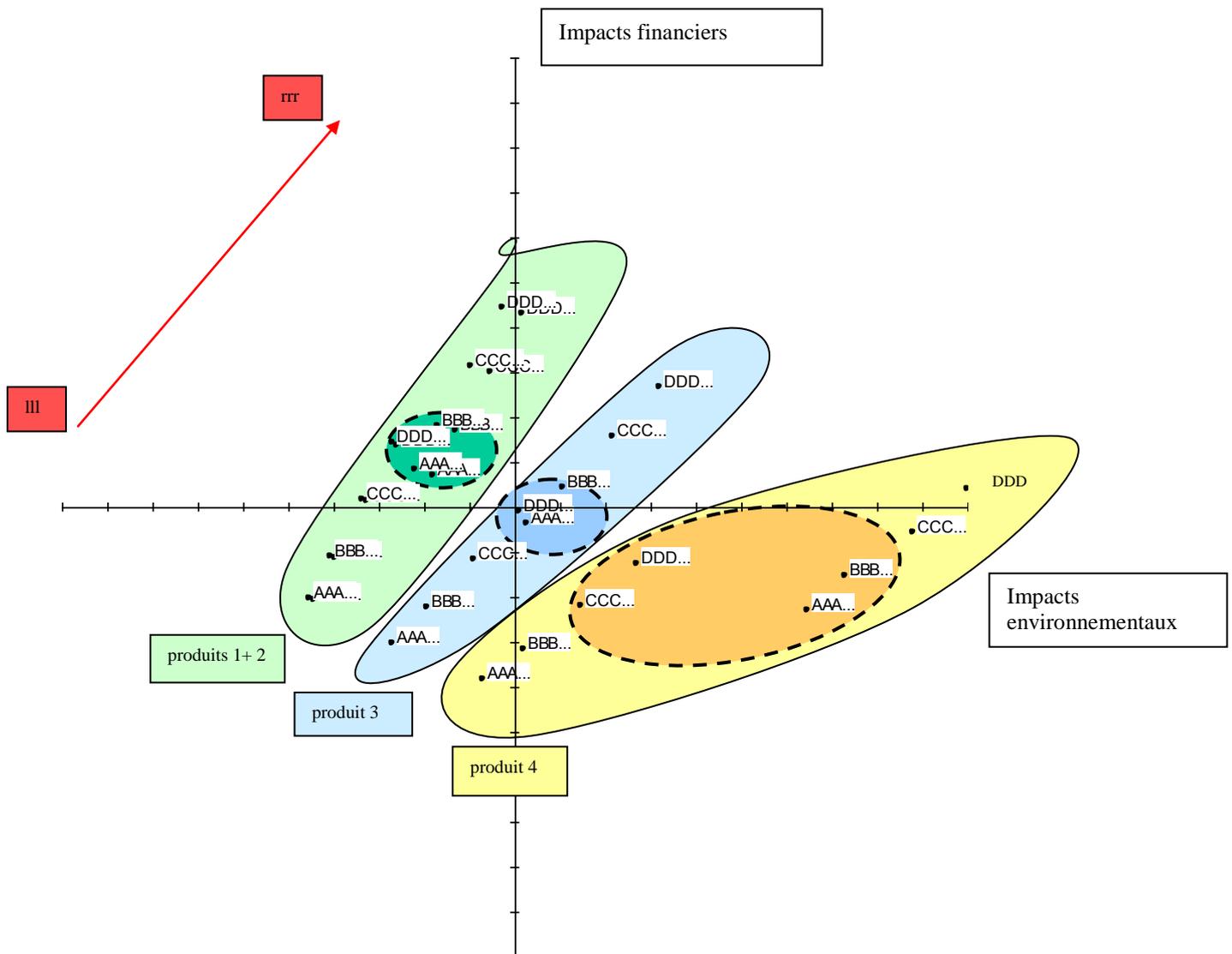


Figure 59 : Représentation des 32 configurations par ACP sur les deux premiers axes selon l'efficacité

La figure 59 et le tableau 32 apportent un complément d'information à l'analyse deux critères :

- les localisations III émettent moins que les localisations rrr et ont un impact financier moindre (en rouge). Les produits 1 et 2 peuvent être associés. Par contre, nous voyons une nette différence de comportement pour le produit 4. Le produit 4 en localisation III émet autant que les autres types de produit en localisation rrr.

- le type de produits a une très forte influence environnementale puisque nous voyons que les produits 4 (en jaune) ont des résultats très élevés sur l'axe des facteurs environnementaux.

- l'efficacité des entreprises influence les facteurs financiers et les facteurs environnementaux. Quand l'efficacité se dégrade, les résultats se décalent vers le haut et la droite. Les émissions et les coûts financiers augmentent donc avec la dégradation des efficacités.

- un résultat particulier est à noter à la figure 59 en pointillé. Quel que soit le type de produit 1, 2 ou 3, la configuration AAA rrr est équivalente à la configuration DDD III. Pour le produit 4, le niveau de stock et le nombre de kilomètres des configurations CCC III et DDD III sont équivalents à ceux des configurations AAA rrr et BBB rrr. Par contre, les émissions d'équivalent CO₂ sont bien plus fortes pour la configuration en rrr qu'en III.

Pour compléter ces 32 configurations, nous étendons à présent les simulations aux localisations continentales et globales.

II. 3. Efficacité homogène, localisation homogène, quatre produits

Nous élargissons à présent les configurations aux localisations ccc et ggg. Nous obtenons les résultats du tableau 33 et de la figure 60 grâce à la méthode des centres mobiles sur les émissions :

CLASSIFICATION	en tonne équivalent CO ₂	
	émission dues au stockage	émissions dues au transport
produit 4 ccc	3501.99	57253.80
produit 4 ggg	3595.44	104945.00
produits 1 et 3 en ccc-ggg	1189.38	6887.20
produit 2 et produit 1 en III-rrr	9.02	156.52
produit 4 rrr et III en CCC-DDD	3022.16	1291.83
produit 3 III-rrr et produit 4 III en AAA-BBB	1891.45	156.30
TOTAL	1303.28	11213.11

Tableau 33 : Résultats des 64 simulations à localisation et efficacité homogènes en tonne équivalent CO₂

On remarque que quelle que soit la configuration d'efficacité, le produit 4 est toujours plus émetteur que les autres produits. De plus, la localisation est très significative car quelles que soient les efficacités, les localisations ccc et ggg se détachent en termes d'émissions.

Le produit 3 est plus émetteur en terme de transport que le produit 4 dès lors que le produit 3 est en configuration ccc et ggg et le produit 4 en III et rrr. Une chaîne logistique fabriquant des

produits 3 avec des localisations continentale ou globale est donc plus polluante qu'une chaîne logistique produisant des produits 4 avec des localisations locale ou régionale.

Le produit 1 rejoint le produit 3 sur les configurations ccc et ggg et le produit 2 sur les configurations III et rrr.

Nous constatons également que pour le produit 4 les configurations AAA-BBB et CCC-DDD se comportent de la même manière. Ceci confirme notre choix de ne dégrader les efficacités que pour A et D.

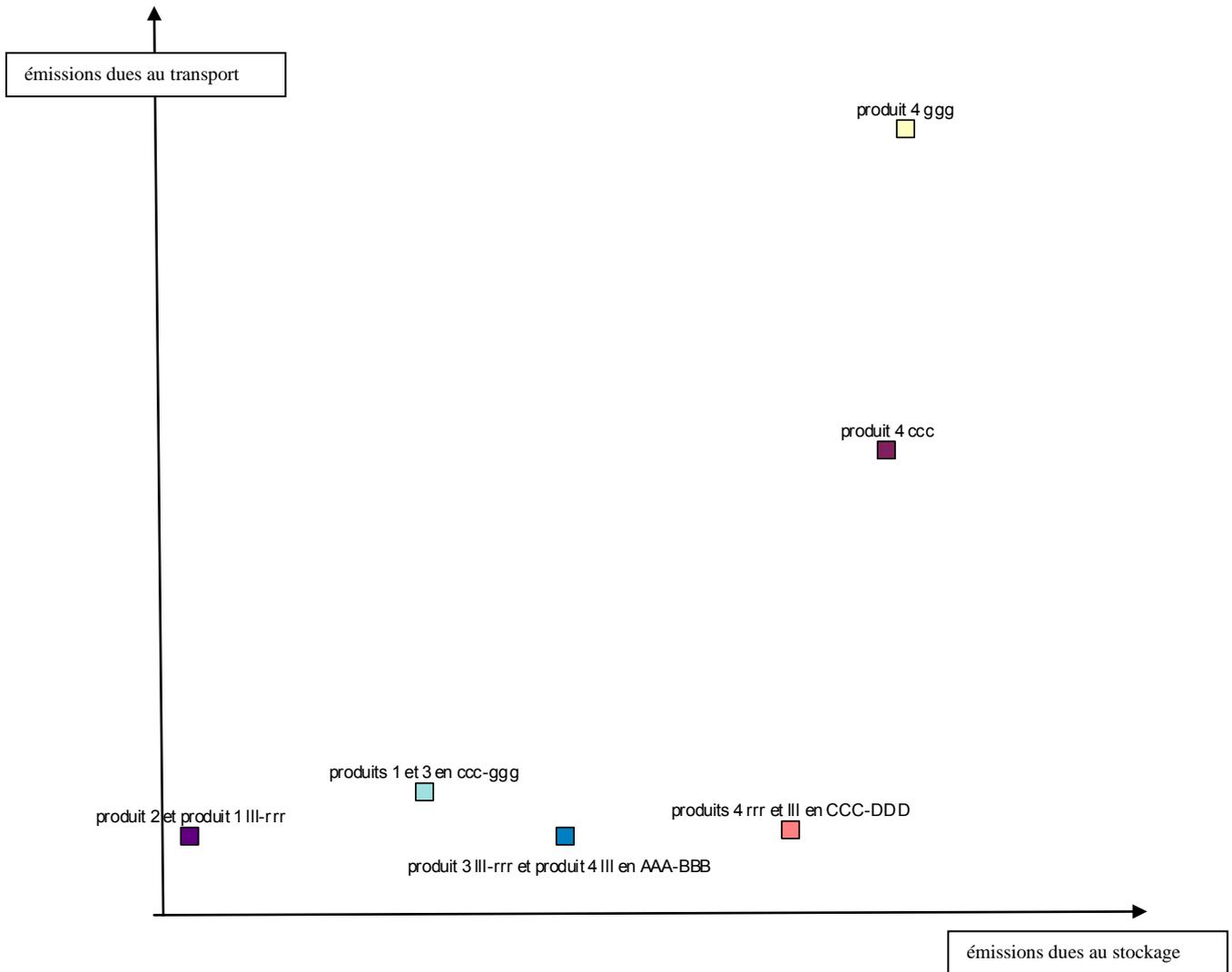


Figure 60 : Classification des 64 configurations selon les émissions

Pour compléter cette analyse, nous réalisons une analyse en composantes principales sur quatre critères : émissions dues au stockage et au transport, nombre de kilomètres parcourus et nombre de produits stockés.

La variance est expliquée ci-dessous en tableau 34:

	f1	f2	f3	f4
Valeur propre	1,930	1,194	0,520	0,355
% expliqué	48,254%	29,91%	13,012%	8,878%
% cumulé	48,254%	78,164%	91,176%	100,000%

Tableau 34 : Valeurs propres des 64 configurations homogènes

Les produits 3 et 4 émettent de manière très significative. Plus l'efficacité est faible et plus la localisation est lointaine, plus ils émettent. Les résultats des configurations ggg sont nettement supérieurs en terme d'émissions a contrario des configurations lll et rrr. Les résultats des produits 3 et 4 sont très influencés par les émissions. Nous voyons également que plus l'efficacité se dégrade, plus les résultats sont élevés.

Les résultats globaux des produits 1 et 2 appartiennent à la même classe. Plus la localisation est lointaine et l'efficacité faible plus les critères financiers sont élevés.

A partir de ces configurations homogènes, nous concluons que le type de produits et les configurations de localisation sont très impactantes. Pour les efficacités, nous confirmons le choix de considérer ensemble les configurations AAA et BBB puis CCC et DDD dans les dégradations des efficacités. Nous allons à présent simuler des configurations à localisation dégradée.