

Méthodologie des PLANS D'EXPERIENCES

Mathilde CASETTA

Unité Matériaux et Transformations (UMET) - CNRS UMR 8207

Equipe Procédés de Recyclage et de Fonctionnalisation

Université de Lille – France

mathilde.casetta@univ-lille.fr

SOMMAIRE

1. Introduction

2. Mise en place d'un plan d'expériences

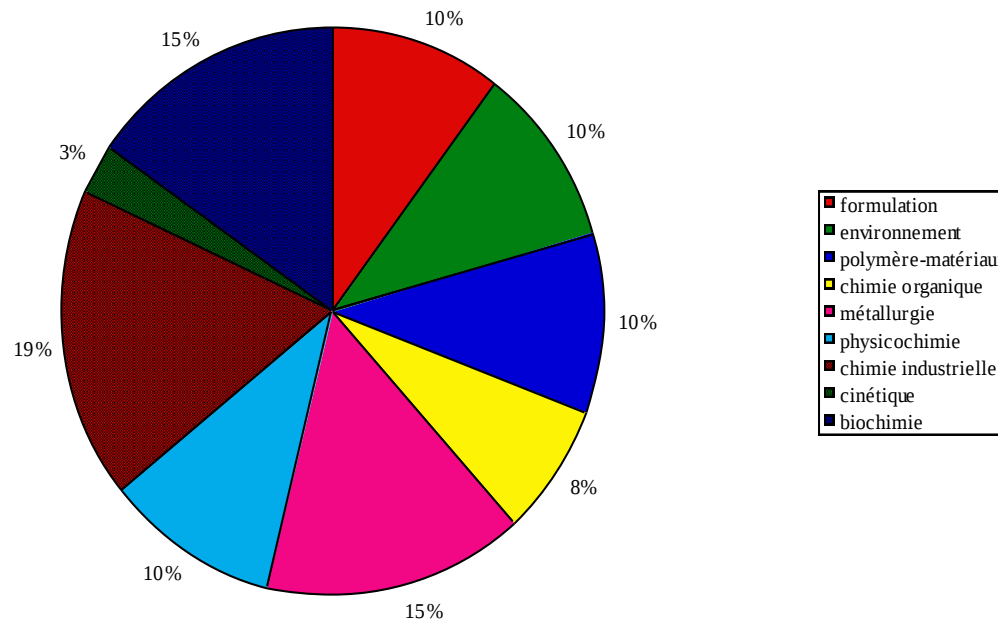
3. Types de plans + exemples

INTRODUCTION

- **Objectif**

Méthode très attractive dans le secteur industriel et en recherche car permet de maîtriser et optimiser la performance d'un produit, d'un procédé, d'une technique expérimentale...

- **Domaines d'application**



INTRODUCTION

- **Définition**

Norme ISO 3534-3

Méthode qui permet d'obtenir un maximum de renseignements sur un procédé en un minimum d'expériences mais besoin d'une organisation logique des essais à réaliser

Suite d'essais rigoureusement organisés, afin de déterminer, avec un minimum d'essais et un maximum de précision, l'influence respective de différents paramètres afin d'optimiser les performances du procédé

- **Terminologie**

FACTEURS

Paramètres d'entrée, pouvant être classés en différentes catégories

Variables quantitatives : quantifiables et mesurables

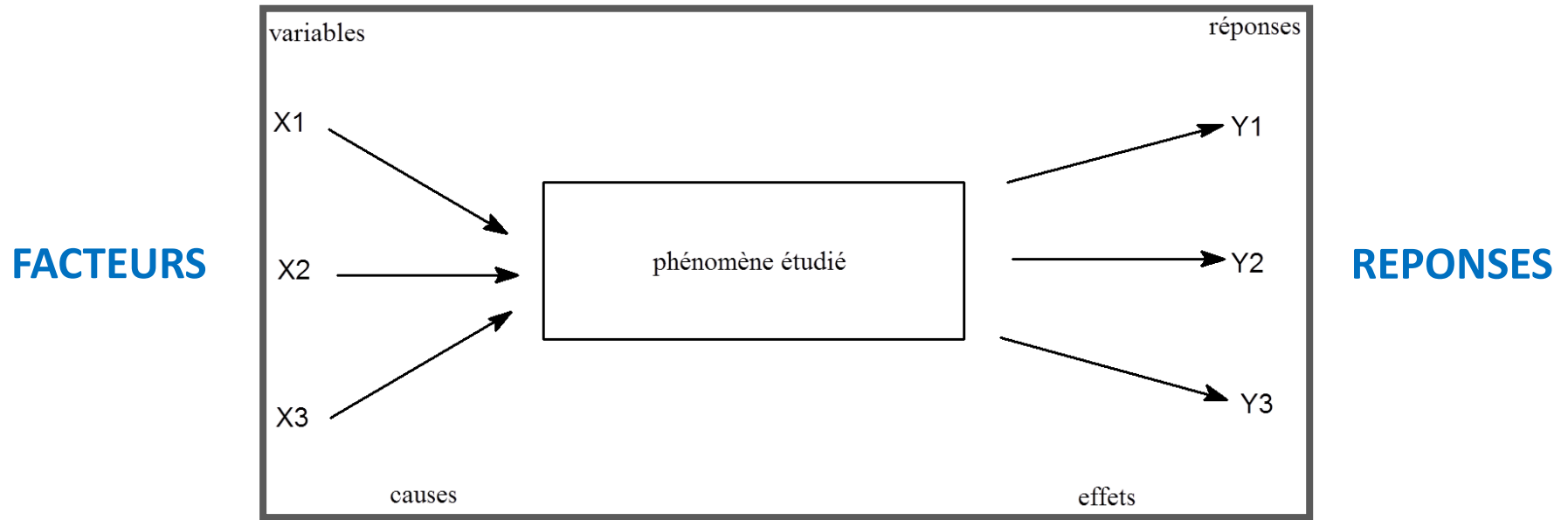
Variables qualitatives : non mesurables mais susceptibles de classement

REPONSES

Paramètres de sortie, pouvant être classés selon les mêmes catégories que les facteurs

INTRODUCTION

• Modélisation



Etablir des relations de cause à effet : comment varient les réponses par rapport aux facteurs ?

- peu de variation : étude sans intérêt
- variation : on essaie de relier les réponses aux facteurs afin de décrire le phénomène étudié

Modélisation mathématique :

$$Y = f(X1, X2, ...)$$

MISE EN PLACE D'UN PLAN D'EXPERIENCES

1. Positionner la situation initiale

- lister tous les paramètres susceptibles d'avoir une influence
- comment évaluer le résultat final
- choix des facteurs à étudier
- définir les contraintes expérimentales (afin de mieux cibler le domaine d'étude)
- choix du domaine expérimental (valeurs minimales et maximales)
- étude primaire de la variabilité (conditions extrêmes)

2. Etablir une stratégie expérimentale

- choix du type de plan (nombre de facteurs, précision recherchée...)
- établir la liste des essais à réaliser
- définir l'ordre des essais
- réaliser les essais

MISE EN PLACE D'UN PLAN D'EXPERIENCES

3. Analyse des résultats

- détecter les résultats aberrants (analyse statistique)
- estimer les coefficients du modèle (calcul matriciel)
- détermination des conditions expérimentales optimales (si tout se passe bien !)

4. Validation des résultats

- réaliser un essai de confirmation en se plaçant dans les conditions optimales
- comparer la réponse prédite par le modèle avec la valeur expérimentale obtenue pour valider la démarche

5. Conclusion

- interpréter les résultats de l'analyse

MISE EN PLACE D'UN PLAN D'EXPERIENCES

Difficultés potentielles

1^{er} cas : Impact des paramètres sur la réponse évalué correctement

Explications mécanistiques clairement justifiées

→ **on peut conclure sur l'étude et valider les solutions obtenues**

2^{ème} cas : Aucune tendance n'est observée → **on ne peut pas conclure sur l'étude**

Plusieurs raisons:

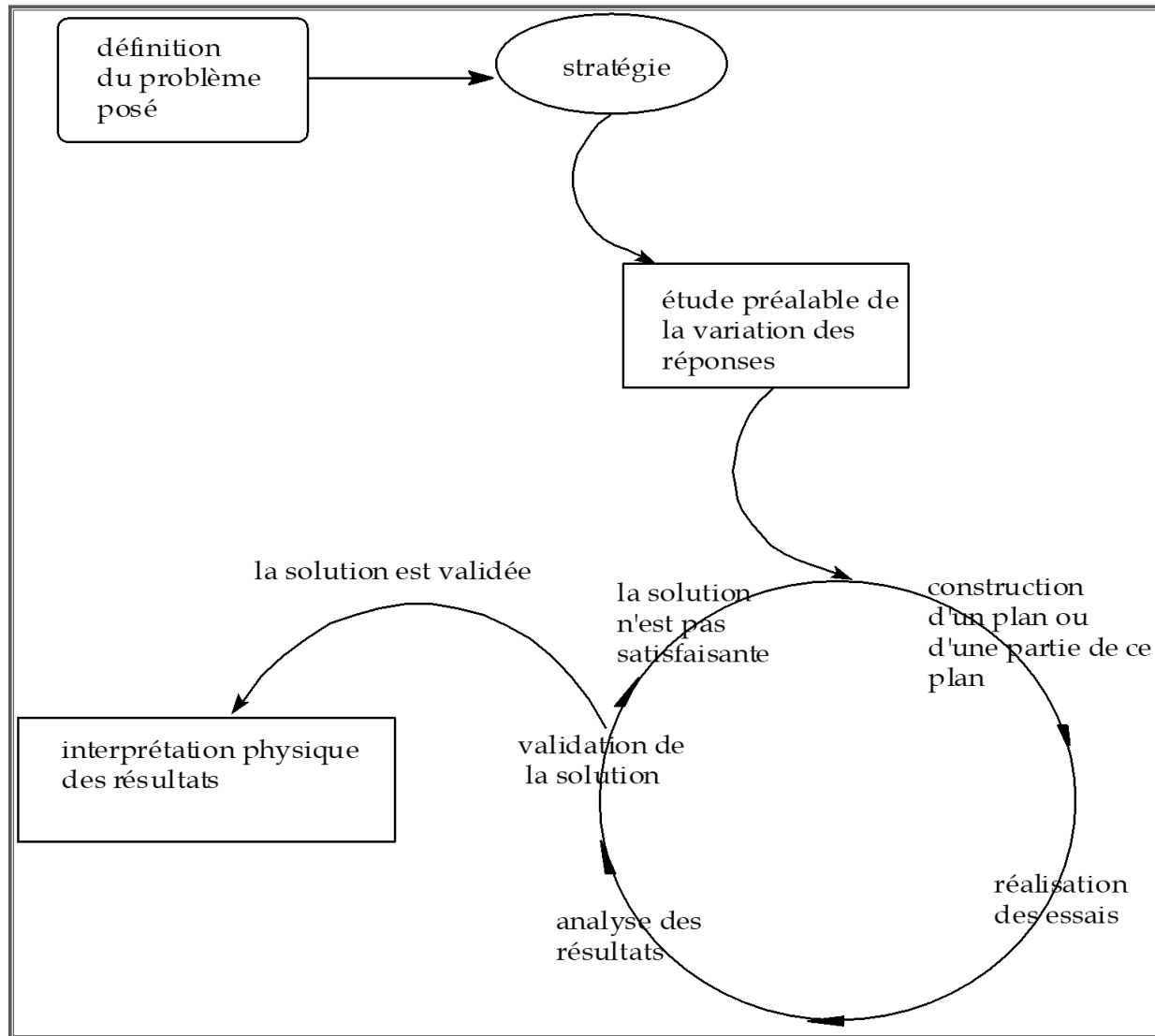
- présence d'erreurs expérimentales
- facteurs ou domaine de variation des facteurs mal choisis
- non prise en compte de facteurs ayant un impact important sur le processus
→ processus non maîtrisé
- mauvais choix du plan d'expériences



Respecter les conditions établies par le plan d'expériences

Réaliser toutes les expériences de la même façon afin de ne pas introduire de variables supplémentaires qui ne seraient pas contrôlées

MISE EN PLACE D'UN PLAN D'EXPERIENCES



TYPES DE PLANS

- **Plans de criblage ('screening')**

Quantification de l'influence de chaque facteur sur la réponse

Comparaison des facteurs

→ **dégagement de TENDANCES**

Modèle mathématique :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \varepsilon$$

ex : plan d'Hadamard

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

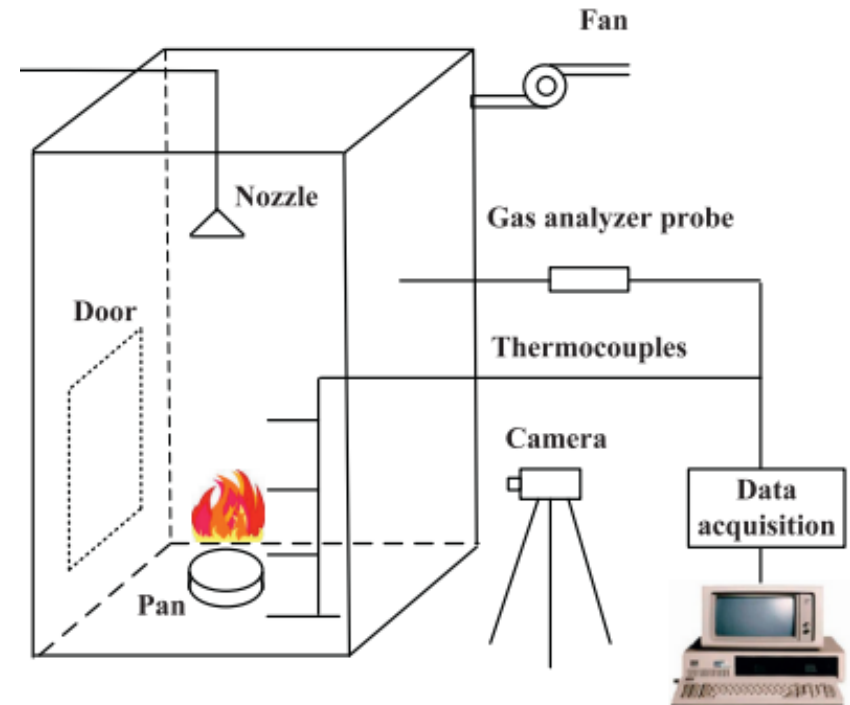
ex : plans factoriels

Plan factoriel complet

Numerical Investigations on Water Mist Fire Extinguishing Performance: Physical and Sensitivity analysis

Objectif :

- Utilisation de la mécanique des fluides numérique (CFD) pour modéliser une 'géométrie' simple de brouillard d'eau
- Reproduction des conditions expérimentales d'un incendie dans un petit compartiment fermé
- Comparaison des résultats avec les résultats expérimentaux obtenus par L. Yinshui



- A. Robinet, K. Chetehouna, A. Cablé, E. Florentin and A. Oger, *Fire* 2022, Vol. 5, 176
- L. Yinshui, J. Zhuo, W. Dan t and L. Xiaohui, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2014, Vol. 52, 174-181

Plan factoriel complet

Numerical Investigations on Water Mist Fire Extinguishing Performance: Physical and Sensitivity analysis

	Input Parameter	Unit	Minimum	Maximum
Water mist flow rate	Q	L/min	2.0	5.0
Spray cone angle	θ	deg	60	120
Discharge duration	τ_d	s	2.0	40.0
Median droplet diameter	D_v	μm	80	130

Réponses : température moyenne

fraction volumique moyenne en O_2

fraction volumique moyenne en CO_2

fraction massique en CO en ppm

- A. Robinet, K. Chetehouna, A. Cablé, E. Florentin and A. Oger, *Fire* 2022, Vol. 5, 176
- L. Yinshui, J. Zhuo, W. Dan t and L. Xiaohui, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2014, Vol. 52, 174-181

Plan factoriel complet

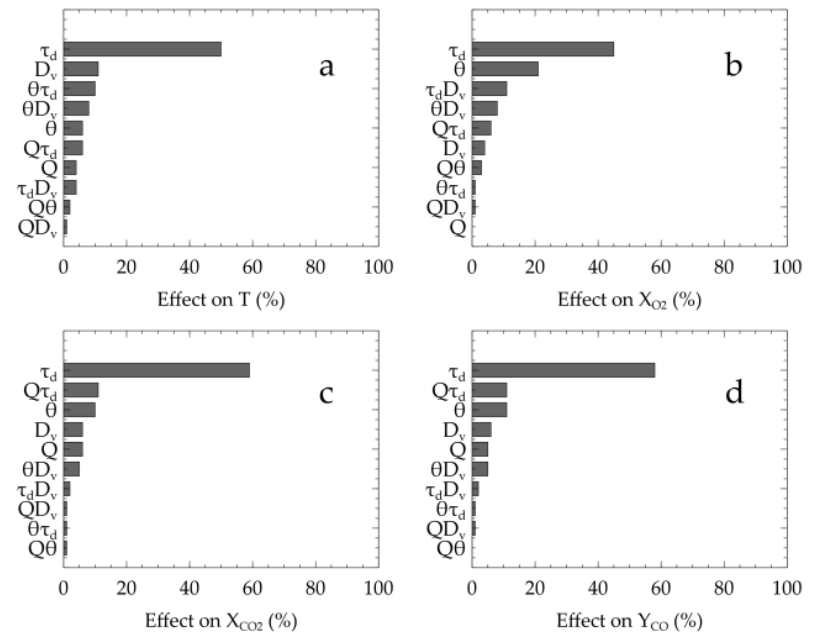
Numerical Investigations on Water Mist Fire Extinguishing Performance: Physical and Sensitivity analysis

Plan d'expériences pour déterminer les paramètres d'entrée de leur modèle :
16 simulations

Principales conclusions :

- Durée de pulvérisation : paramètre le plus influent pour les 4 réponses
- Influence de l'angle de pulvérisation sur la fraction volumique en O_2

Effects of the input parameters on the output quantities for the factorial design method



- A. Robinet, K. Chetehouna, A. Cablé, E. Florentin and A. Oger, *Fire* 2022, Vol. 5, 176
- L. Yinshui, J. Zhuo, W. Dan t and L. Xiaohui, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2014, Vol. 52, 174-181

Plan factoriel complet

Numerical Investigations on Water Mist Fire Extinguishing Performance: Physical and Sensitivity analysis

Absolute error between the predicted values for the different output quantities and the experimental results of Yinshui et al. [23] for the validation case.

Sensitivity Analysis Method	Temperature	O ₂ Concentration	CO ₂ Concentration	CO Concentration
Factorial design	23%	2%	16%	12%
Linear ANOVA	31%	5%	28%	26%
Nonlin. ANOVA	29%	5%	24%	21%
Chaos ANOVA	29%	5%	24%	21%

Conclusion : Plan factoriel plus performant que les méthodes de décomposition de la variance pour toutes les réponses

- A. Robinet, K. Chetehouna, A. Cablé, E. Florentin and A. Oger, *Fire* 2022, Vol. 5, 176
- L. Yinshui, J. Zhuo, W. Dan t and L. Xiaohui, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2014, Vol. 52, 174-181

Plan factoriel fractionnaire

Results from a full-scale smoke alarm sensitivity study

Scénario incendie	Incandescence (cartouche chauffante électrique)	Flamme (flamme propane)
Densité de la mousse	21 kg/m ³	29 kg/m ³
Type de tissu	Coton	Polyester
Localisation du feu	Chambre	Salon
Ventilation	Porte ouverte	Porte fermée

Mesure du temps (s) avant fonctionnement de l'alarme avec différents types de détecteurs de fumée :

- Détecteur photoélectrique
- Détecteur à ionisation
- Détecteur mixte

* T. Cleary, *Fire Technology* 2014, Vol. 50, 775-790



Plan factoriel fractionnaire

Results from a full-scale smoke alarm sensitivity study

Réalisation d'un plan d'expériences contenant 8 expériences
Chaque expérience réalisée 3 fois

Quelques conclusions :

1. Mode d'ignition a une influence importante :
incandescence avec temps 10 à 25 fois plus longs que
pour flamme
2. Temps plus longs avec mousse PU à forte densité
($\forall$ mode d'ignition)
3. Temps plus courts avec PES que coton
4. Pour un feu incandescent : temps plus longs dans le
salon que dans la chambre (40 à 200%)
5. Comparaison efficacité détecteurs selon le mode
d'ignition ...



* T. Cleary, *Fire Technology* 2014, Vol. 50, 775-790

TYPES DE PLANS

- **Modélisation de surface de réponse**
(RSM = response surface modelling)

Estimation du comportement d'une réponse sur le domaine d'étude
Détermination des conditions optimales

→ **atteinte d'un OPTIMUM ou d'une VALEUR CIBLE**

Modèle mathématique :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \varepsilon$$

ex : plan composite, plan de Doehlert, plan de mélange...

Plan de mélange

Flammability properties of intumescent PLA including starch and lignin

Variables	Fraction	Levels					
		0	0.125	0.25	0.5	0.625	1
X_1	U_1 , PLA	0.6	0.6375	0.675	0.75	0.7875	0.9
X_2	U_2 , APP	0.1	0.1375	0.175	0.25	0.2875	0.4
X_3	U_3 , starch	0	0.0375	0.075	0.15	0.1875	0.3
X_4	U_4 , lignin	0	0.0375	0.075	0.15	0.1875	0.3

Critères :

- LOI > 30 vol%
- Minimiser la quantité d'APP
- Maximiser la quantité d'amidon et/ou de lignine

* C. Réti, M. Casetta, S. Duquesne, S. Bourbigot and R. Delobel, *Polymer for Advanced Technologies* 2008, Vol. 19, 628-635

Plan de mélange

Flammability properties of intumescent PLA including starch and lignin

Mixture design and results of LOI values					
Experiments	Natural variables				LOI values
	U_1	U_2	U_3	U_4	
1	0.9	0.1	0	0	24
2	0.6	0.4	0	0	44
3	0.6	0.1	0.3	0	29
4	0.6	0.1	0	0.3	25
5	0.75	0.25	0	0	28
6	0.75	0.1	0.15	0	25
7	0.75	0.1	0	0.15	22
8	0.6	0.25	0.15	0	38
9	0.6	0.25	0	0.15	30
10	0.6	0.1	0.15	0.15	24
11	0.7875	0.1375	0.0375	0.0375	26
12	0.6375	0.2875	0.0375	0.0375	30
13	0.6375	0.1375	0.1875	0.0375	29
14	0.6375	0.1375	0.0375	0.1875	25
15	0.675	0.175	0.075	0.075	24
16	0.675	0.175	0.075	0.075	28

* C. Réti, M. Casetta, S. Duquesne, S. Bourbigot and R. Delobel, *Polymer for Advanced Technologies* 2008, Vol. 19, 628-635

Plan de mélange

Flammability properties of intumescent PLA including starch and lignin

Conclusions :

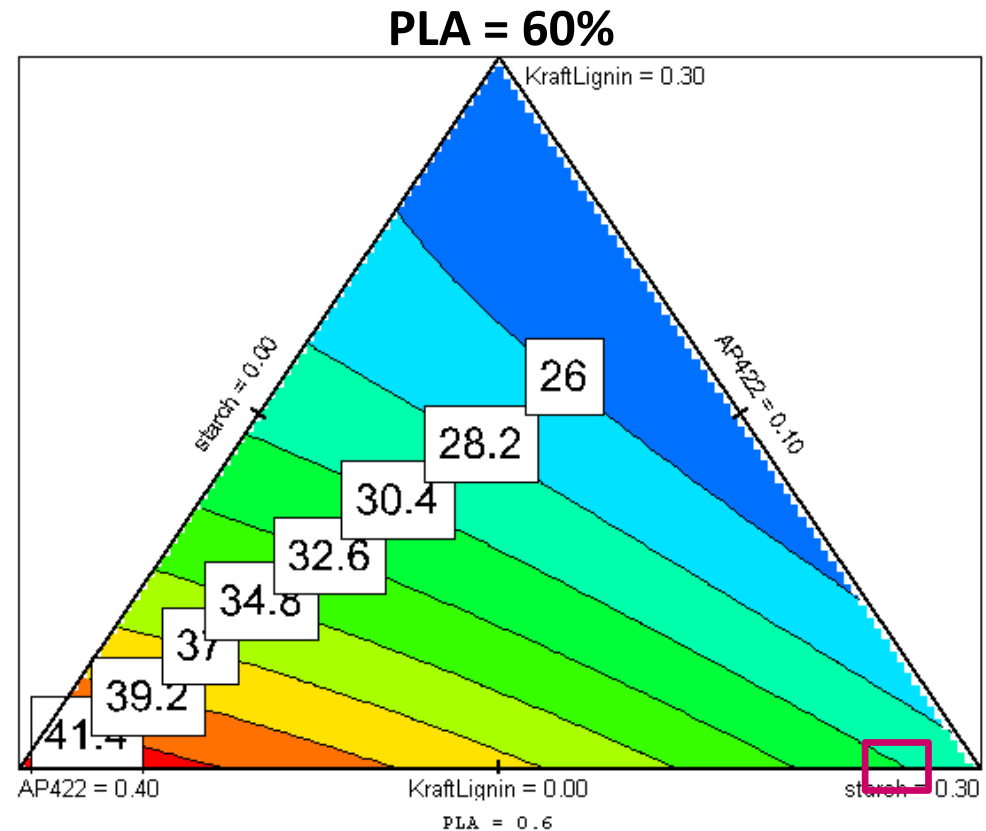
- Augmentation du LOI avec la quantité d'APP
- A même taux d'incorporation, LOI plus élevés avec amidon

Conditions optimales :

12% APP / 28% amidon

LOI prédit = 30,4 vol%

LOI exp = 32 vol%

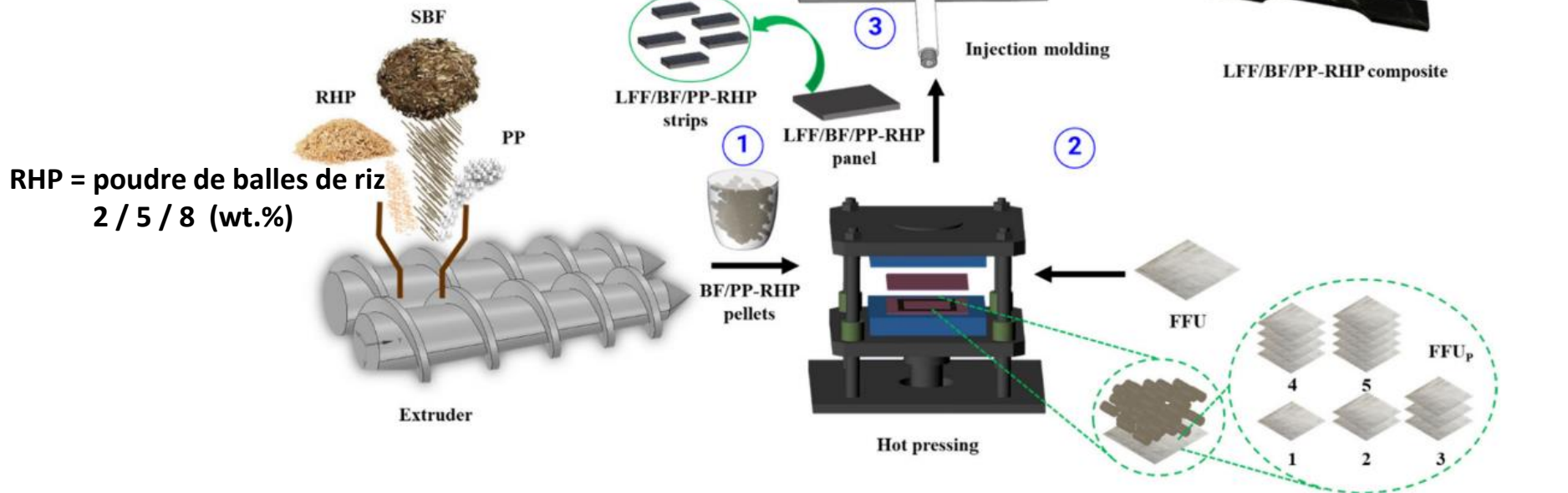


* C. Réti, M. Casetta, S. Duquesne, S. Bourbigot and R. Delobel, *Polymer for Advanced Technologies* 2008, Vol. 19, 628-635

Plan de Box-Benkhen

Multi-objective optimization of hybrid polypropylene composites for enhanced mechanical, thermal, and flame-retardant properties

BF = fibres de basalte (wt.%) : 5 / 20 / 35



FFUp = nombre de plis : 1 / 3 / 5

* TMN Tran and al., *Polymer Composites* 2024, Vol. 45, 13951-13970

Plan de Box-Benkhen

Multi-objective optimization of hybrid polypropylene composites for enhanced mechanical, thermal, and flame-retardant properties

Réponses : propriétés mécaniques
stabilité thermique (ATG)
propriétés feu (cône)

Critères :

- Minimiser le pHRR
- Maximiser la quantité de résidu
- Maximiser la résistance à la traction
- Maximiser le module de traction

Conditions optimales :

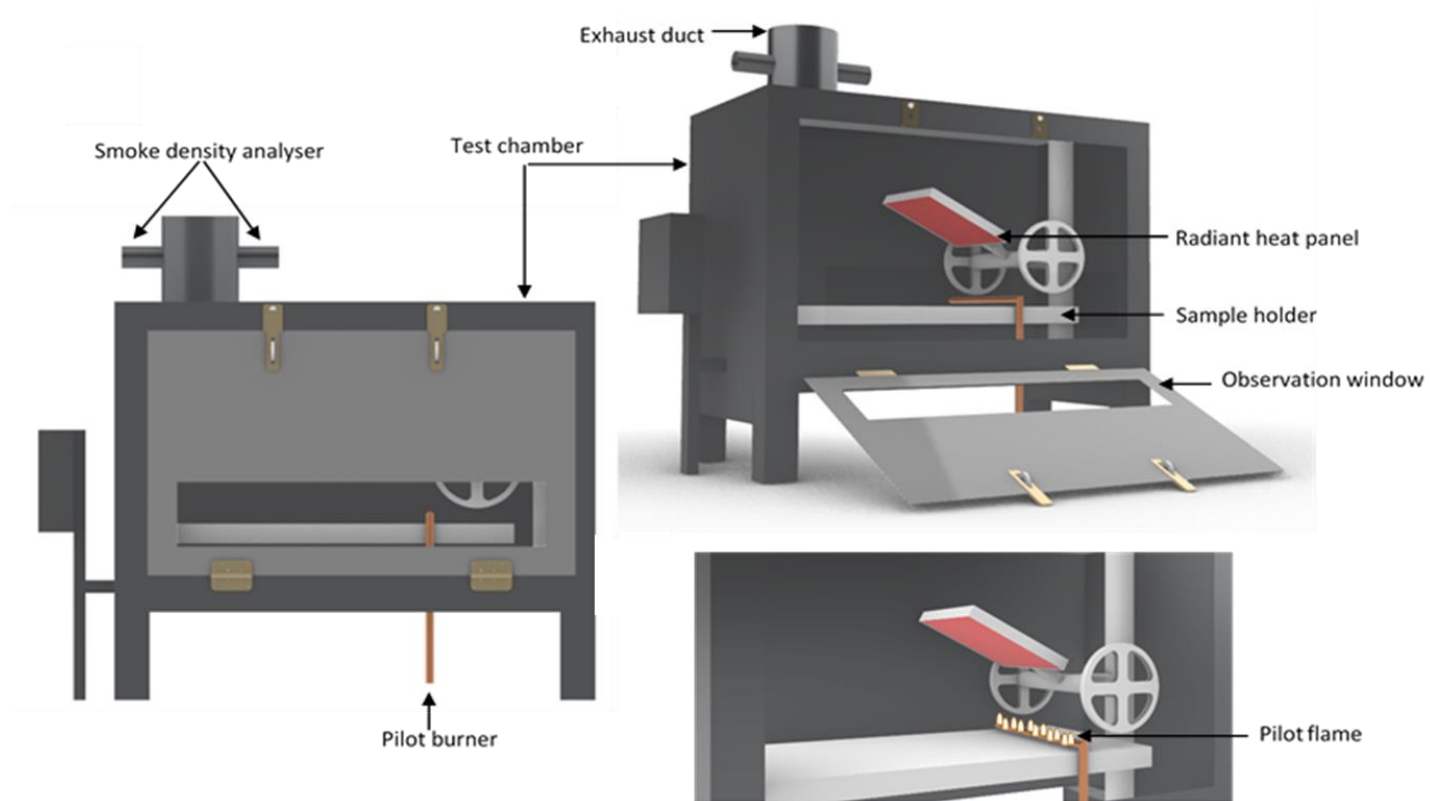
35wt% BF / 8wt.% RHP / 4 plis

No.	Constituent of hybrid composites parameters		
	%BF	%RHP	FFU _p
1	5	2	3
2	5	8	3
3	35	2	3
4	35	8	3
5	5	5	1
6	5	5	5
7	35	5	1
8	35	5	5
9	20	2	1
10	20	2	5
11	20	8	1
12	20	8	5
13	20	5	3

* TMN Tran and al., *Polymer Composites* 2024, Vol. 45, 13951-13970

Plan composite

Design of a radiant panel test at reduced scale for the high throughput development of artificial turf structures



* A. Paturel, M. Casetta, S. Rambour, L. Janus and S. Duquesne, *Journal of Fire Sciences* 2022, Vol. 40(2), 97-114