
COMPREHENSION DU PHENOMENE DE CORROSION SUR AIGUILLES IRRADIEES DANS LE REACTEUR PHENIX

B CORNU, L PANTERA

Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache
Département d'Etudes des Combustibles, Laboratoire de Contrôle Non Destructif
Bât. 214, 13108 Saint-Paul Lez Durance

RESUME :

La limite supérieure du taux de combustion des éléments combustibles du Réacteur à Neutrons Rapides PHENIX est fortement conditionnée par un phénomène de corrosion interne de leur gaine en acier

Un nouveau programme d'étude de cette corrosion a été mis en place en 1987 par le Département d'Etudes des Combustibles du CEA/CEN Cadarache. Les résultats contribueront à déterminer les choix d'orientation pour le projet E.F.R. (European Fast Reactor).

Le travail présenté se situe dans le cadre de ce nouveau programme. Se basant sur les données issues d'une campagne expérimentale menée dans PHENIX de 1980 à 1990, son objectif est la mise en œuvre d'une méthodologie statistique qui permette une meilleure compréhension du comportement corrosif des éléments combustibles.

Nous présenterons dans un premier temps le cadre de notre étude, les objets manipulés et les variables :

- conditions d'irradiation (variables explicatives)
- évaluation de la corrosion (variables à expliquer)

Nous développerons ensuite le parcours statistique réalisé au sein des données. Celui-ci a permis d'apporter un regard global nouveau sur le phénomène de corrosion dans PHENIX, relativisant certains cas d'expérience pénalisants pour le projet d'irradiation à très fort taux de combustion. L'analyse des conditions d'irradiation met en évidence une stratégie différente de l'utilisation des assemblages en réacteur qui serait à l'origine de l'évolution de la corrosion sur les dix dernières années. La suppression artificielle de l'influence spécifique de cette modification de stratégie permet de faire ressortir des variables conditionnant plus directement le phénomène physique de corrosion. Les différentes vues synthétiques nous ont ainsi permis de sélectionner quelques objets clés à partir desquels il a été possible d'établir un modèle empirique de la corrosion. Celui-ci indique alors qu'il est envisageable d'atteindre un taux de combustion élevé dans la mesure où l'on effectue une gestion fine des conditions d'irradiation au cours de la vie des éléments combustibles.

Mots-clés : Nucléaire, Réacteur à Neutrons Rapides, Taux de Combustion, Température, Corrosion, Courants de Foucault, Analyse en Composantes Principales.

Introduction

Les Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR) présentent des atouts de fonctionnement non négligeables :

- Leur combustible est un mélange de plutonium 239 et d'uranium naturel. Le plutonium 239 n'existe pas dans la nature mais constitue **un produit de déchet** des centrales classiques.
- Leur rendement (de l'ordre de 40 %) est plus élevé que dans toute centrale thermique.
- Ils permettent de tirer plus d'énergie de l'uranium et limitent la production de déchets.

La centrale PHENIX a été la première réalisation française (et mondiale) permettant de démontrer la possibilité de concevoir, construire et exploiter dans des conditions industrielles une centrale utilisant un réacteur à neutrons rapides, refroidi au sodium

Pour extraire le maximum d'énergie du combustible, il faut porter celui-ci à des **taux de combustion** très élevés. Le taux de combustion est, par définition, la quantité d'énergie extraite d'une masse donnée de combustible pendant un séjour en réacteur. Il s'exprime généralement en MégaWatt-jour par tonne (MWj/t). On envisage d'atteindre des valeurs de l'ordre de **125000 MWj/t** à **150000 MWj/t** pour les réacteurs du futur. Les résultats d'observations menées sur PHENIX contribueront à déterminer les choix d'orientations pour le projet E.F.R. (European Fast Reactor)

Les limites du taux de combustion ne sont pas fixées pour les RNR par les dommages causés au combustible mais par le comportement des gaines métalliques qui l'encerclent : l'acier de celles-ci doit présenter avant tout une bonne résistance au flux neutronique qui est très intense dans les RNR. Sinon, on assiste, à partir d'une certaine dose d'irradiation, à un phénomène de gonflement : le taux sera ainsi limité par une valeur de déformation telle que les capacités de manutention à l'intérieur du réacteur soient maintenues. Un choix judicieux des matériaux de gainage et des conditions de fabrication particulièrement soignées des gaines ont permis de pallier cet handicap. De 1980 aux alentours de 1985 a été utilisé l'acier austénitique **316 écroui**, stabilisé au titane. Une expérience a permis d'atteindre la valeur de **115000 MWj/t**. Les déformations de gaines présentées étaient tout de même très importantes et il était difficile de concevoir mécaniquement un tel comportement pour la majorité des gaines. Une amélioration de l'acier précédent a permis de mettre en place à partir de 1985 (et jusqu'en 1990, date de fin d'expérimentation pour notre étude) l'acier austénitique **1515 écroui**. Ainsi des taux de combustion de **112000 MWj/t** ont pu être atteints avec des déformations de gaines acceptables. Mais est apparu un phénomène de corrosion de la surface de gaine directement en contact avec le combustible. Sur les dix années d'expérimentation, une évaluation de la corrosion dans son ensemble a été possible grâce à la méthode de contrôle non destructif par courants de FOUCAULT (CdF). Aisée d'utilisation et peu coûteuse, elle a permis d'observer à ce jour plusieurs milliers d'aiguilles dont fait partie notre échantillon (**mille gaines environ**). Ces gaines sont issues de **34 blocs expérimentaux** caractéristiques de la conduite d'irradiation du réacteur PHENIX.

Et bien que ces corrosions n'aient encore jamais conduit à des ruptures de gaines, il est vite apparu que le dommage de celles-ci risquait fort de devenir une nouvelle limite de fonctionnement, et qu'il était donc indispensable, sinon de comprendre ces phénomènes, de savoir au moins les éviter. De fait, les facteurs susceptibles d'influencer la corrosion sur quelques années d'irradiation étaient

devenus trop nombreux : Evolution des fabrications, mouvements dans le réacteur, conditions d'irradiation .

De plus, en l'absence de modèle physique précis a priori, on ne connaît même pas les paramètres physiques à prendre vraiment en compte.

Le nombre d'aiguilles examinées étant important, nous avons pensé qu'une démarche d'analyse de données (dans le sens de se laisser guider par les données) devrait permettre de prendre en compte l'ensemble des paramètres, sans aucun a priori, et d'orienter les recherches

I. Présentation de l'étude

I.1. Les objets analysés

Du schéma d'ensemble de la centrale PHENIX, nous ne retiendrons que la partie "*bâtiment du réacteur*" à l'intérieur de laquelle se situe le **cœur**. Le cœur est l'endroit où se produisent les fissions, donc où est engendrée la puissance thermique du réacteur (une fission est la rupture d'un noyau d'atome, elle s'accompagne d'un énorme dégagement d'énergie)

La matière fissile est utilisée sous forme d'oxyde mixte de plutonium et d'uranium ($UO_2 - PuO_2$) et est appelée **combustible**. L'oxyde fritté sous forme de pastilles de petit diamètre (5,5 mm) est enfermé dans des **gaines d'acier austénitique** ayant $450 \mu m$ d'épaisseur. La disposition des pastilles *fissiles* s'étend sur une longueur de 850 mm. De part et d'autre est placée de la matière *fertile* (oxyde d'uranium appauvri). L'ensemble constitue l' **aiguille combustible** (figure 1). On réalise alors des faisceaux de 217 aiguilles qui sont placés chacun à l'intérieur d'un *tube hexagonal* en acier austénitique de quelques millimètres d'épaisseur. Ce nouvel ensemble est appelé **assemblage combustible**.

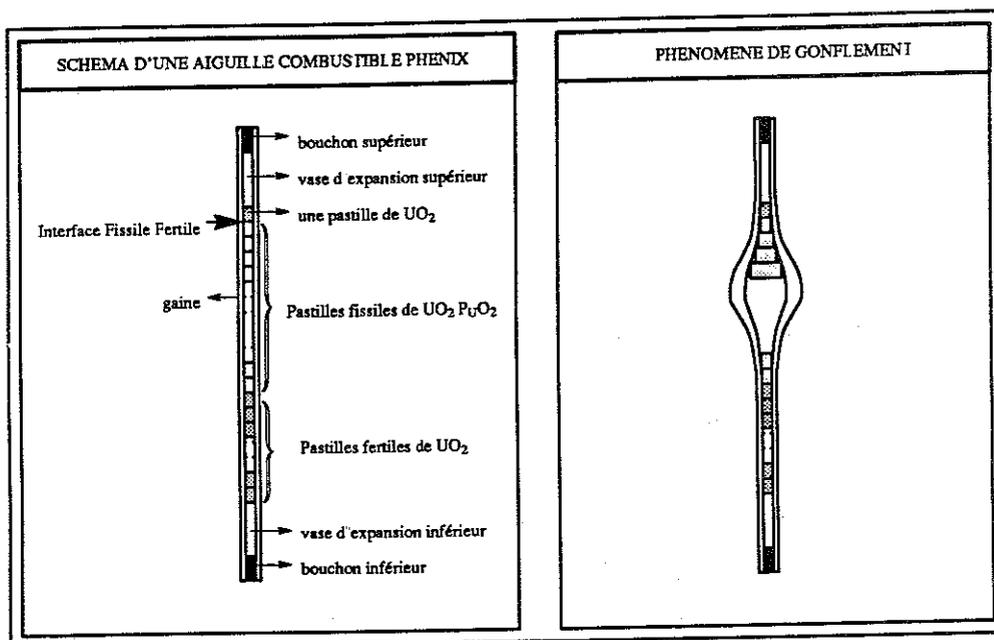


figure : 1

C'est la zone fissile du cœur qui reçoit la totalité des assemblages combustibles pour leur irradiation. La zone fissile comprend deux parties concentriques appelées **cœur 1** et **cœur 2** qui diffèrent par l'enrichissement en plutonium des assemblages qui y sont placés pour maintenir une puissance uniforme sur l'ensemble du réacteur. Le flux neutronique a tendance à diminuer de façon significative au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre : pour lutter contre cette chute d'efficacité, on relève l'enrichissement en plutonium des assemblages de cœur externe de manière à pouvoir effectuer une remontée en puissance, à flux plus faible (figure 2).

Quelques emplacements sont occupés par des assemblages de contrôle (dits *barres de commande*) dont le combustible a été remplacé par du carbure de bore enrichi (qui absorbe les neutrons). Ces assemblages sont mus par un système mécanique indépendant qui permet d'agir sur leur immersion à l'intérieur du cœur contrôlant ainsi l'intensité du flux neutronique et donc la conduite du réacteur.

Notre étude porte sur les gaines des aiguilles contenues dans les assemblages combustibles.

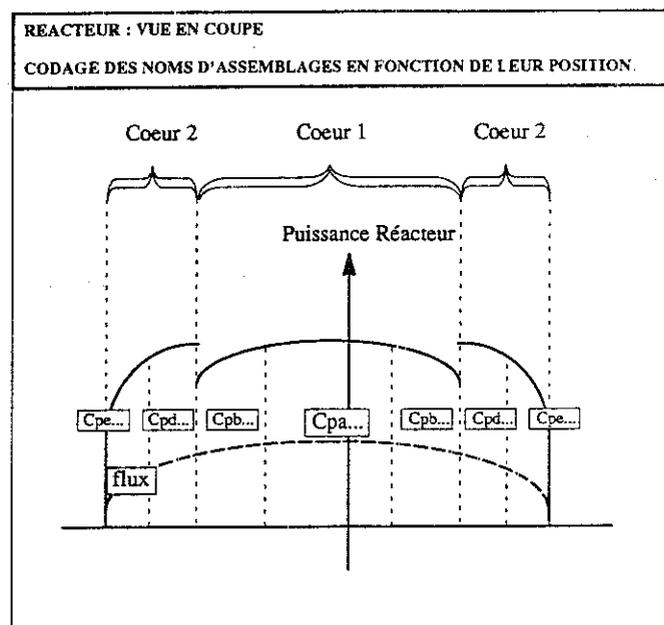


figure : 2

I.2. Les conditions d'irradiation : variables explicatives

L'optimisation de la gestion du combustible conduit à rechercher un taux de combustion moyen sur l'ensemble du cœur le plus élevé possible donc à garder un bon facteur d'aplatissement de la puissance (bonne répartition sur les assemblages)

Au cours du temps, on gère l'usure du combustible en utilisant les trois possibilités suivantes :

- agir sur les barres de commande pour augmenter l'intensité du flux neutronique,
- rapprocher les assemblages du centre du cœur en fonction de l'usure de leur combustible,
- effectuer un renouvellement du combustible.

Le rôle d'exploitant de centrale est de tenir compte de toutes ces contraintes pour tirer parti au mieux de l'énergie contenue dans les assemblages combustibles.

Des paramètres de fonctionnement issus directement de mesures effectuées sur le cœur ou de valeurs provenant de calculs théoriques permettent de guider les opérateurs dans leur gestion du réacteur

Un arrêt de celui-ci s'impose tous les cycles (environ 3 mois), ce qui correspond au renouvellement des assemblages usés. Mais en pratique, on assiste à des plages d'irradiation qui peuvent être plus courtes. Un cycle est en fait constitué de plusieurs configurations successives que l'on nomme **chargements** (variant de quelques jours à un cycle) qui résultent du déplacement d'assemblages ou du remplacement suite à un événement particulier (rupture de gaine) Nous possédons une valeur de chaque paramètre d'irradiation par chargement. Nous mesurons les quatre variables suivantes :

– Les Jepp (Jours Equivalents à Pleine Puissance)

Ils sont habituellement utilisés pour caractériser les durées d'irradiation d'un chargement

– Les Dpa (Déplacements Par Atome)

Il s'agit d'une estimation du nombre moyen de déplacements que subit chaque atome à la suite des chocs neutroniques. Cette valeur évalue le *dommage* causé aux gaines.

– La Température Nominale de Gaine (Tng)

C'est la température maximale de la gaine de l'aiguille la plus exposée au flux neutronique parmi toutes les aiguilles de l'assemblage

– La puissance moyenne (Pm)

Puissance moyenne fournie par l'assemblage.

Les valeurs d'irradiation sont fournies par assemblage. Celui-ci constituera donc l'unité statistique pour toute notre étude.

I.3. Evaluation de la corrosion : variables à expliquer

Des examens de contrôle non destructifs ont été mis en place pour améliorer la connaissance des éléments combustibles quant à leur tenue sous irradiation et leur propension à la corrosion. Ils jouent un rôle primordial dans la mise au point des lois d'évolution des aciers et du combustible.

Parmi eux, la méthode des **courants de Foucault** permet de détecter les parties corrodées ainsi que leur profondeur.

L'exemple de la figure 3 représente un enregistrement CdF, résultat d'une mise en œuvre réelle de la mesure :

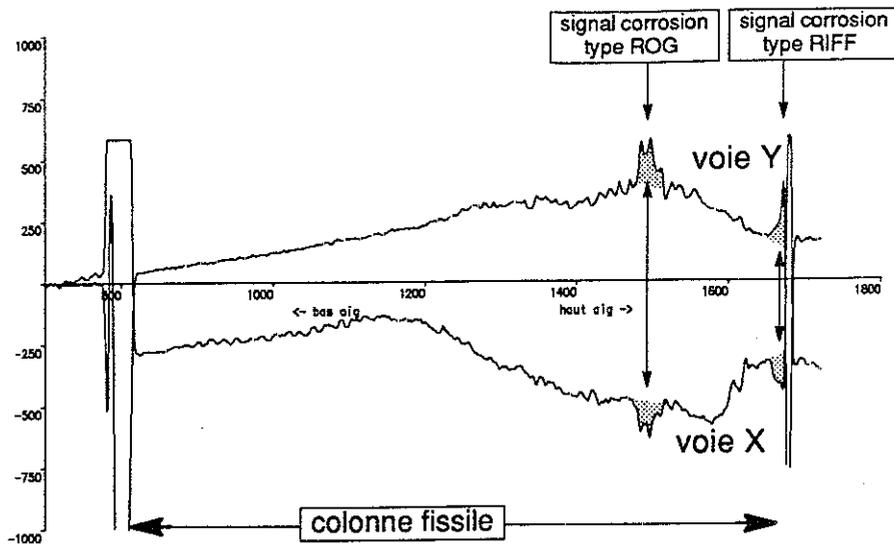


figure : 3

Ce type d'enregistrement est obtenu par déplacement d'une bobine encerclante au long de l'aiguille irradiée. Les deux "voies" X et Y, variations de tension représentatives de la variation d'impédance dans le plan complexe (cf. principe des courants de Foucault [CONT]), sont numérisées et stockées par le système d'acquisition attaché au banc d'examen par courants de Foucault.

Le diagnostic de corrosion des aiguilles irradiées sur la base de ces enregistrements CdF s'appuie sur une expérience de plus de dix années d'observations croisées CdF-examens destructifs. Il en ressort les points essentiels suivants :

Le diagnostic de corrosion a pour règle principale la coexistence de deux événements qui se manifestent indépendamment et respectivement selon chacun des deux axes X et Y de représentation d'impédance de l'appareil CdF

On désigne cet événement comme le signal CdF (X-,Y+) de corrosion.

On distinguera deux types de corrosion selon l'emplacement de la corrélation entre les deux pics :

- dans la moitié supérieure de colonne fissile on parlera de ROG (Réaction Oxyde Gaine)
- en haut de colonne fissile, on parlera de RIFF (Réaction Interface Fissile Fertile)

Le meilleur moyen de garantir une cohérence du diagnostic courants de Foucault sur un grand nombre d'aiguilles était d'utiliser une procédure d'observation automatique.

Il fallait donc être capable de détecter les pics et les creux des signaux CdF X, Y pour ensuite en déduire l'existence d'une corrosion ROG ou RIFF (corrélation entre un pic X- et un pic Y+). Nous utilisons une méthode développée en collaboration avec l'Université de Technologie de Compiègne : le logiciel Boulimi [BORG][MARS]. L'idée consiste à simuler le roulement d'un disque sur la courbe jusqu'à ce que celui-ci tombe dans un trou pour y être immobilisé. On commence avec un disque de très faible rayon puis on répète le passage avec

des disques de rayons de plus en plus élevés jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de blocage sur la courbe

On retient alors l'amplitude X- comme seul indice de gravité du dommage dimensionnel par corrosion. Cette mesure sera exploitée selon une codification en cinq classes qui permettent de définir une bonne corrélation avec la véritable profondeur de corrosion des gaines. Les bornes de ces classes ont été fixées sur la base des observations expérimentales préalables (figure 4):

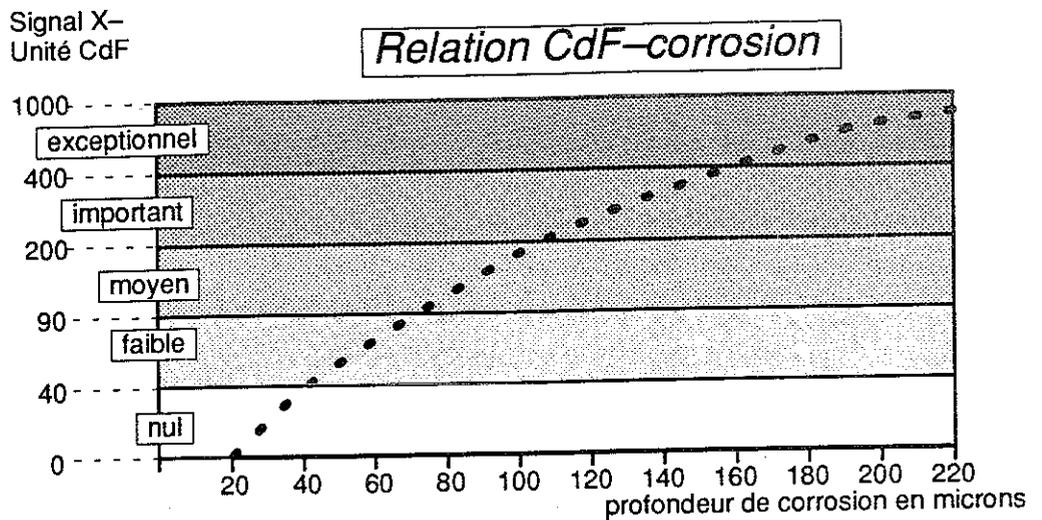


figure : 4

II. Analyse statistique

Nous allons observer d'une part l'état de corrosion des assemblages et d'autre part les conditions d'irradiation auxquelles ils ont été soumis. Les deux analyses seront réalisées indépendamment l'une de l'autre. Nous croiserons par la suite les deux points de vue. Toute bonne corrélation sera alors interprétée comme une relation de cause à effet.

II.1. Analyse de la corrosion par les courants de Foucault

II.1.1. Préliminaire : les "histogrammes" de corrosion

Dans un premier temps, nous avons procédé à une mise en ordre des données CdF, puis nous avons dû nous faire une opinion sans préjugé de l'état corrosif de PHENIX.

Les mille aiguilles de l'échantillon sont analysées automatiquement par le logiciel BOULIMI, les résultats stockés dans une base de données. On établit alors **par assemblage** deux vecteurs de fréquences, un pour la Rog un pour la Riff, construits selon les *cinq* classes indiquées plus haut. Nous sommes donc en présence d'un tableau de contingence dont les lignes représentent les assemblages (de 1 à 34) et les colonnes chaque classe de corrosion ($2 \times 5 = 10$ classes).

Nous l'étudierons par une analyse factorielle des correspondances. On manipulera ainsi la totalité de chaque histogramme en évitant l'inconvénient de la réduction à une moyenne et un écart type.

Trois analyses successives vont être nécessaires pour décanter nos idées sur l'étendue de la corrosion :

1. une analyse instable due à la présence d'assemblages corrodés de façon très particulière,
2. une mise en évidence de ces assemblages va nous permettre de l'améliorer pour aboutir à
3. une analyse stable qui nous fournira la représentation de référence pour comparer les histogrammes

II.1.2. La Rog importante et exceptionnelle : une corrosion bien singulière

L'instabilité de la première approche se caractérise (figure 5) par l'excentricité de quelques assemblages par rapport aux autres qui se retrouvent accumulés sur une surface réduite du plan. Ceci est dû au caractère très singulier des classes de corrosion de Rog importante et de Rog exceptionnelle à cause de leurs très faibles effectifs sur l'ensemble de l'échantillon et dans une moindre mesure des classes de Riff importante et de Riff exceptionnelle. A partir de la représentation barycentrique des assemblages par rapport aux classes d'histogrammes, on s'aperçoit qu'il n'y a pas simultanément sur un assemblage de la corrosion extrême en Rog et en Riff.

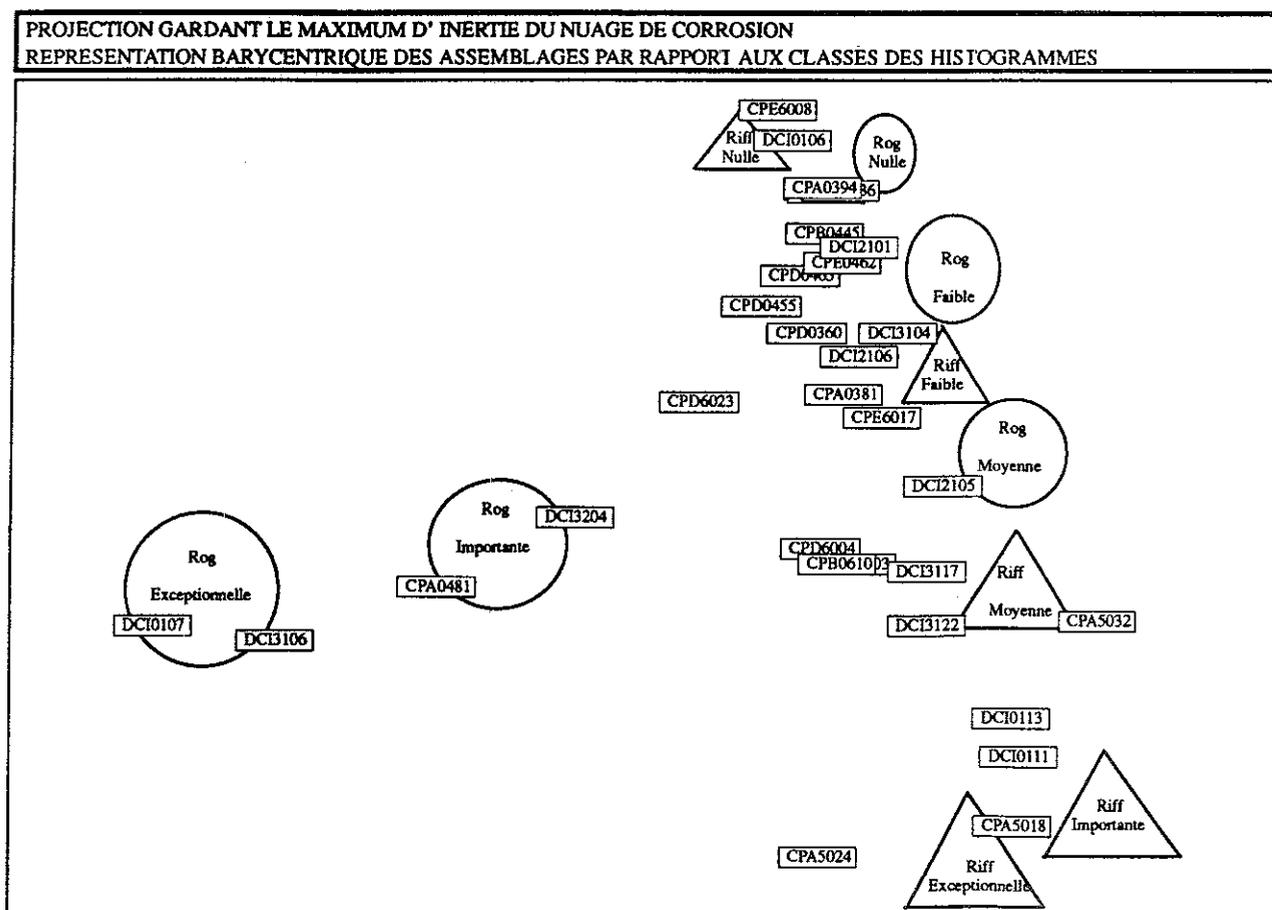


figure : 5

Analyse des Histogrammes de Corrosion : Instabilité de la première étude

II.1.3. Des assemblages hors norme

Un autre point de vue statistique (utilisation d'une métrique particulière [CAUS]) axé sur la recherche d'objets marginaux (appelés outliers en statistique) nous indique les assemblages très éloignés de la configuration moyenne de corrosion (figure 6). Nous y avons retrouvé les assemblages "qui faisaient le plus parler d'eux" parmi les métallurgistes à cause de leurs corrosions très inquiétantes à savoir les assemblages aux déformations de gaines (cf. introduction) exceptionnelles (et aux Rog exceptionnelles), ceux aux Riff exceptionnelles situées sur des aiguilles particulières appelées fausses jumelles (parce que l'état de corrosion de leurs voisines dans l'assemblage n'est absolument pas comparable), la Riff sur l'essai d'un nouveau combustible. Mais nous faisons apparaître le **Cpa5032**, passé totalement inaperçu auparavant, *seul assemblage de notre échantillon* à avoir effectué un début d'irradiation en cœur 2 avant d'être déplacé en cœur 1. Cette observation est d'autant plus intéressante qu'aucune Rog n'y a été décelée alors que la Riff y est importante. Cet objet est l'archétype de ce qu'on appelle en statistique un outlier [MCCU], ce n'est absolument pas un point aberrant : *il nous permettra même de mettre en place un scénario de corrosion*. Le plan de l'étude suivante n'est obtenu qu'à partir des assemblages du reste du nuage mais on continuera à visualiser les outliers (excepté les très fortes déformations dont la corrosion est trop particulière) pour pouvoir les situer par rapport au comportement général.

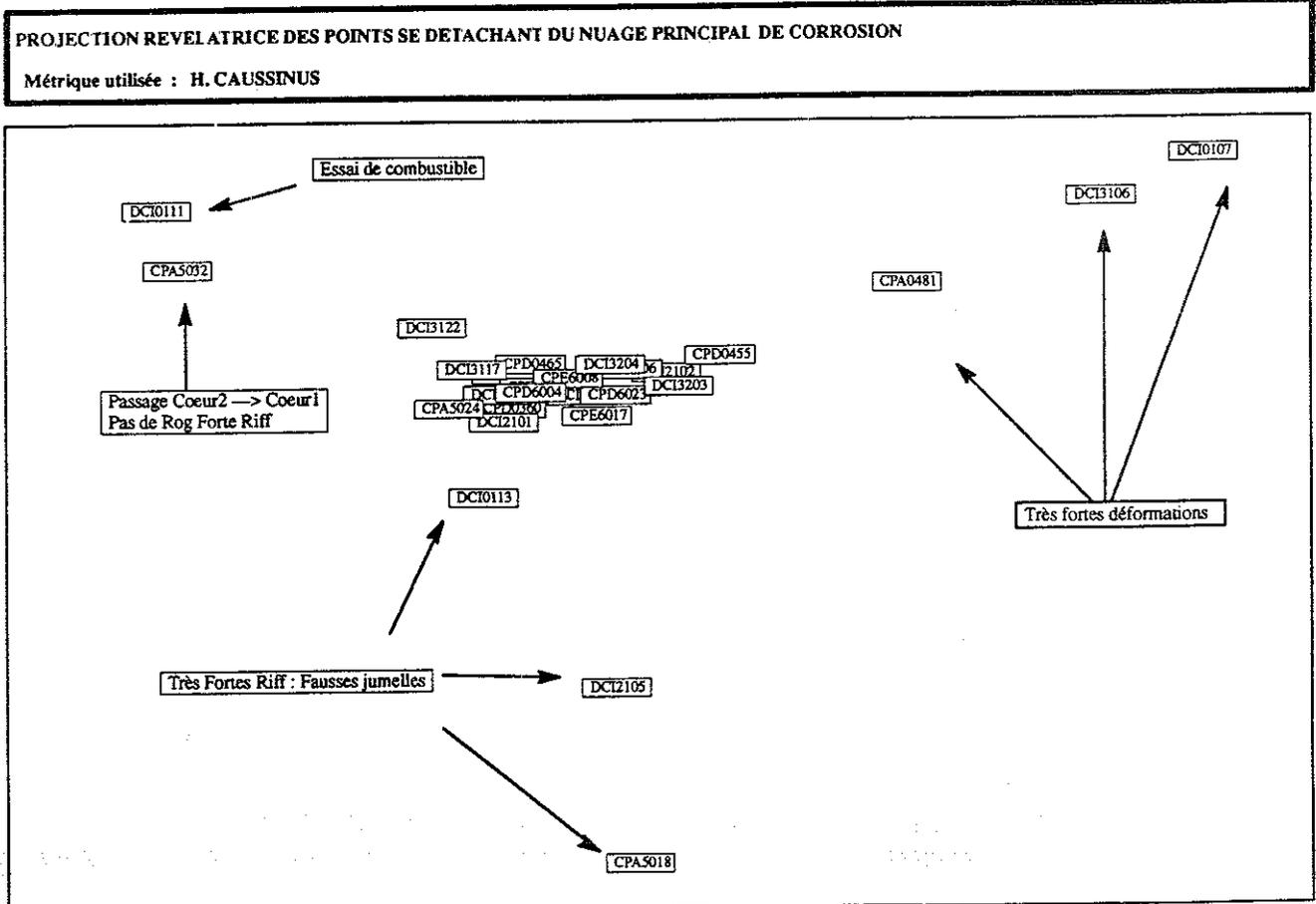


figure : 6

Analyse des Histogrammes de Corrosion : Détection d'éventuels Outliers

II.1.4. La tendance générale : Les aciers 316Tie et 1515Tie corrodent différemment

Nous obtenons cette fois-ci une représentation stable (figure 7) : les assemblages participent de façon homogène à l'obtention du plan de projection qui rend bien compte de la totalité du nuage. On y observe ce qu'il est courant d'appeler un effet GUTTMAN (schématisé par la parabole) : les assemblages se répartissent sur l'axe 1 selon un déplacement de leur moyenne d'histogramme vers les classes de corrosion élevée. Si on avait mis en évidence précédemment l'exclusion des deux types de corrosion dans les classes extrêmes, on s'aperçoit ici d'une évolution conjointe jusqu'aux intensités moyennes, comme si la Rog importante et la Rog exceptionnelle (qui s'extrayaient complètement de la direction principale du nuage global) étaient régies par un processus différent (en l'occurrence la déformation). On perçoit très bien la forme d'histogramme particulière du Cpa5032 (creuse).

Autre constatation essentielle : la forte tendance de l'acier 1515Tie à "riffier" par rapport à l'acier 316Tie.

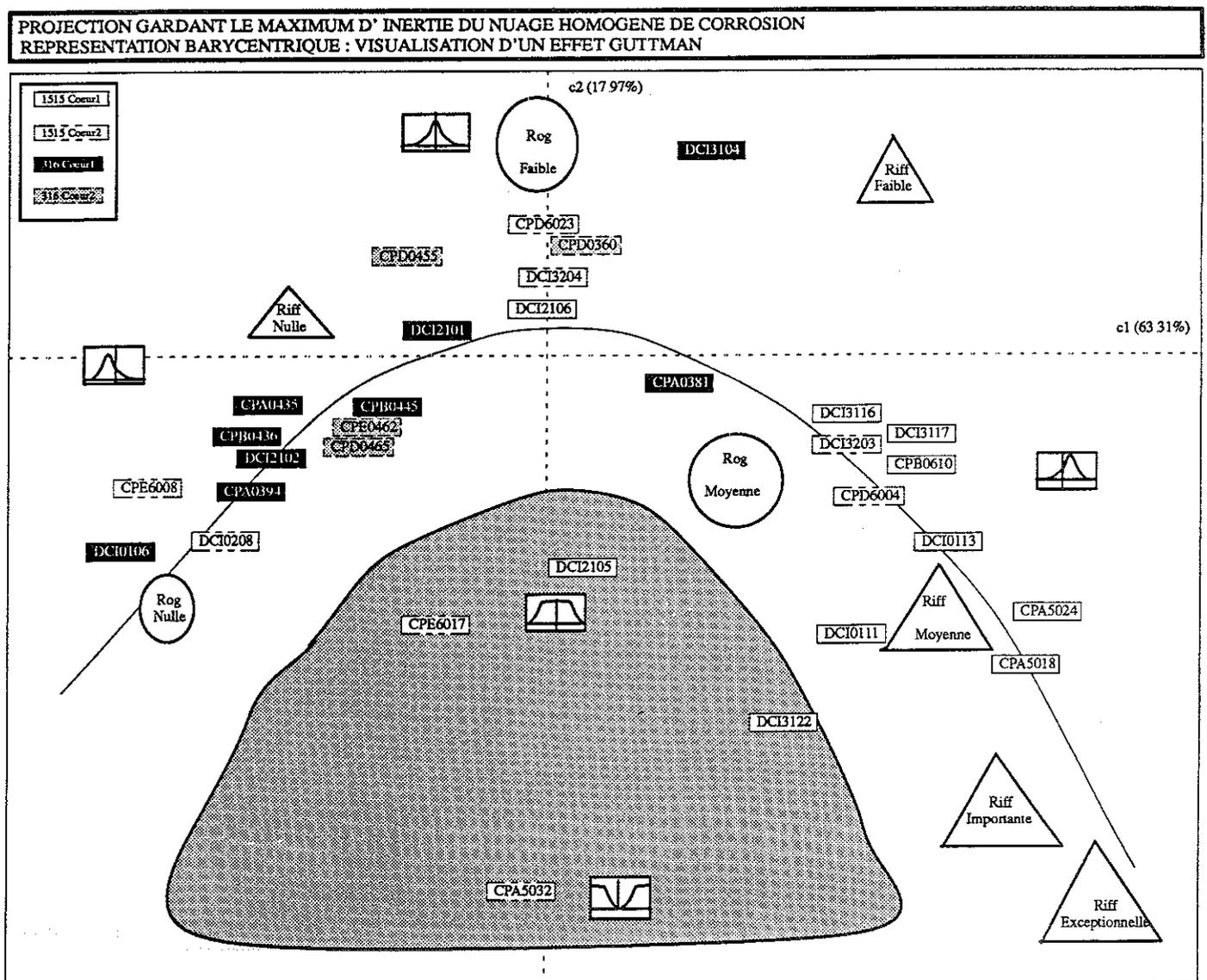


figure : 7 Analyse des Histogrammes de Corrosion : Analyse Stable

Remarque :

Pour résumer l'information contenue dans cet espace de corrosion, nous décidons de le structurer en effectuant une classification qui nous fournit cinq classes de corrosion expliquant 70 % de l'inertie. Ce classement sera utilisé lorsque l'on comparera ces résultats aux résultats obtenus dans l'espace d'irradiation.

II.2. Analyse historique : les conditions d'irradiation de PHENIX de 1980 à 1990

II.2.1. Préliminaire : les variables d'irradiation

Afin d'aboutir à une unité statistique utilisable par les méthodes d'analyse, nous procédons de façon classique en effectuant un codage de l'évolution des paramètres d'irradiation au cours du temps. Pour chaque variable (Tng, Dpa), nous avons défini un ensemble de descripteurs tels que la température maximale atteinte sur une vie entière, le temps d'irradiation moyen à pleine puissance, durée de vie, etc., soit au total **50 variables** sur lesquelles nous appuierons l'analyse de l'irradiation en effectuant une Analyse en Composantes Principales normée

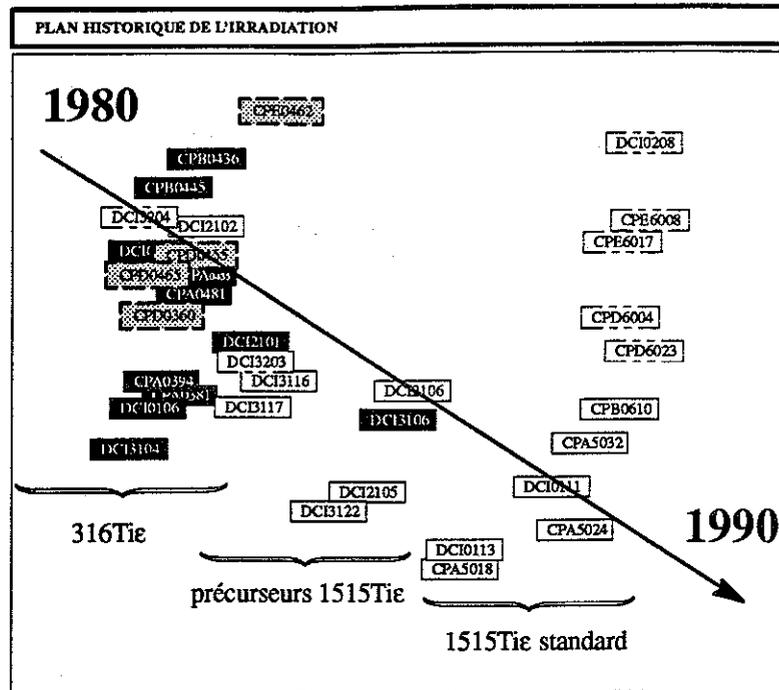
II.2.2. L'année 1985 : modification des consignes d'irradiation et début de l'expérimentation du 1515Tie

L'interprétation des résultats (figure 8) se fait en regardant simultanément le plan factoriel des assemblages et le plan des composantes principales des variables d'irradiation

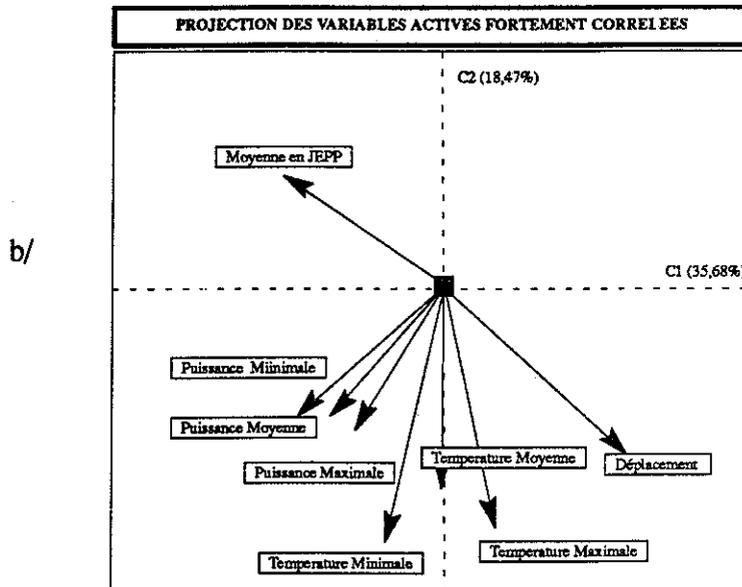
Examinons **la typologie des assemblages** sur le premier plan factoriel (figure 8a). Ces derniers s'organisent sur un arc de cercle selon leur période d'expérimentation. Nous découvrons en effet sur la gauche les 316Tie des années 1980, puis les premiers 1515Tie dont l'expérimentation a débuté en 1985 pour aboutir aux derniers assemblages examinés de 1990. **Les deux types d'aciers n'ont donc pas été irradiés selon des conditions d'irradiation identiques.** La séparation des aciers selon la seconde bissectrice est due à une différence de cyclage (corrélation de la variable "Moyenne en Jepp"). L'acier 1515Tie a subi un surplus de chargements très courts. On remarque de plus que ce phénomène s'est accompagné d'une augmentation du nombre de déplacements des assemblages (anticorrélation des variables "Moyenne en Jepp" et "Déplacement")

Les modifications du cyclage ont été accompagnées d'une augmentation générale de la température en cœur1 car l'arc de cercle est très étiré vers le bas (corrélation des variables de température avec la seconde composante).

La direction fournie par la seconde bissectrice est donc caractéristique du "chahut" occasionné par la conduite de pile et d'une modification globale de la température de cœur1.



1515 Coeur1
1515 Coeur2
316 Coeur1
316 Coeur2



Analyse des conditions d'irradiation :
évolution vers une irradiation plus mouvementée
Séparation des deux types d'acier

figure : 8

Nous décelons ensuite un agencement logique de la part des assemblages selon *leur proximité du centre du cœur* (indiquée par les trois premières lettres composant leur nom (cf figure 2))
Pour les 1515Tie leur disposition est régulière : Cpa... (les très proches du centre), les Cpb... (il n'y en a qu'un dans notre échantillon), les Cpd... puis les Cpe...
Sur l'acier 316Tie, une autre logique d'associations apparaît : les Cpd se retrouvent avec les Cpa et les Cpb avec l'unique Cpe (CPE0462). Nous retrouvons ici une caractéristique de la chute en puissance du réacteur au niveau des Cpb et des Cpe.
 Sur le plan des composantes principales, cette direction est caractérisée par les variables de puissance et de température.

La première bissectrice traduit donc la participation de chaque assemblage à la puissance nominale du réacteur.

Une petite enquête nous a permis de valider l'interprétation :

- A partir de 1985, de nouvelles consignes de conduite de pile ont été mises en place. La centrale PHENIX a en effet été autorisée à irradier une proportion plus grande d'assemblages selon une température plus élevée. La recherche d'une meilleure optimisation des températures s'est alors accompagnée du déplacement plus fréquent des assemblages.
- Un choix différent d'enrichissement en plutonium a été réalisé pour les assemblages de cœur² en 1515Tie. D'où la différence de disposition de l'acier 1515Tie par rapport à l'acier 316Tie.

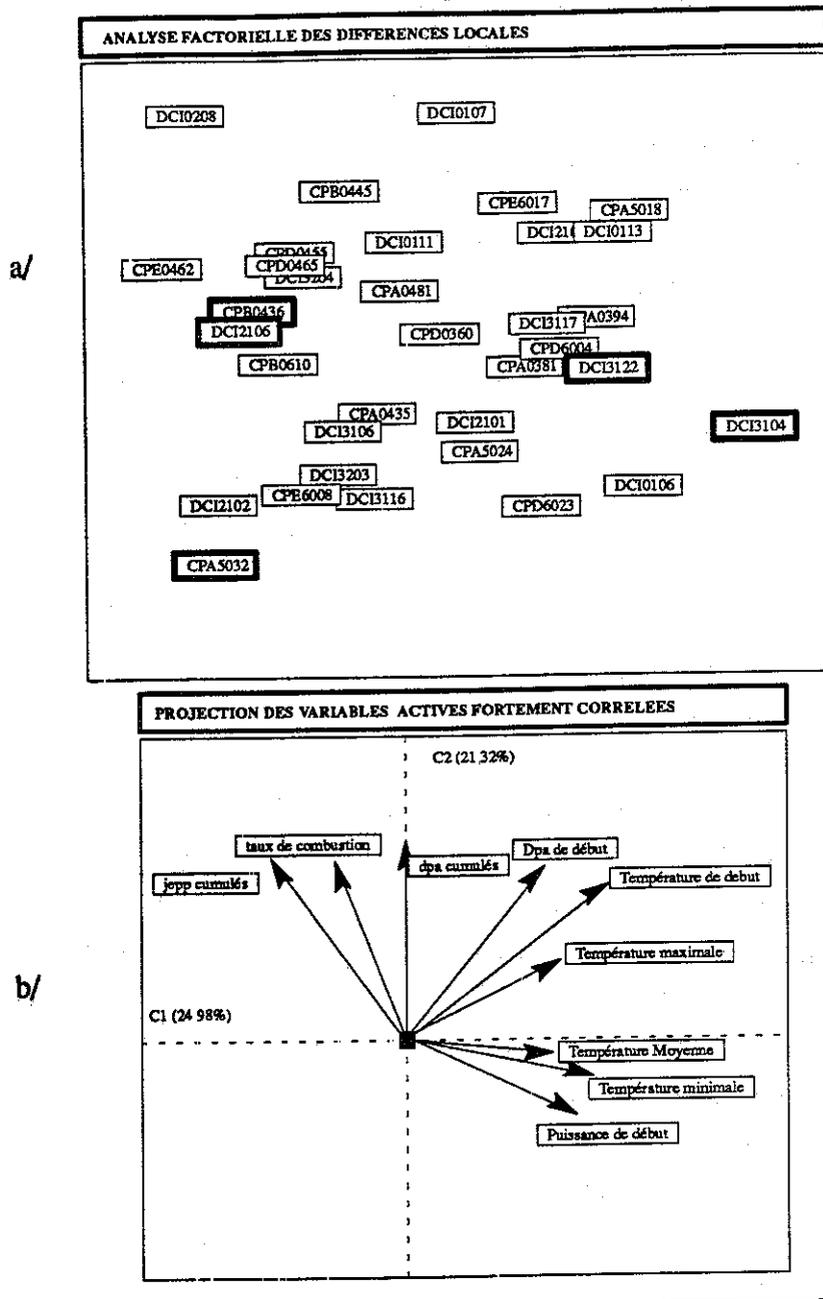
Ce plan caractérise donc la tendance générale de l'irradiation sur les dix dernières années.

La dérive a de fortes chances d'expliquer la différence d'intensité de corrosion 316Tie, 1515Tie qui est ressortie de l'étude des histogrammes, mais avant de le vérifier, nous allons continuer notre investigation. En effet, des différences de corrosion coexistent pour chaque période d'irradiation. On aimerait donc observer la variabilité des paramètres d'irradiation "toutes choses égales par ailleurs" et ainsi mettre en évidence des similitudes de dispersion de certains assemblages par rapport à leurs voisins d'irradiation. On pourrait alors en déduire des variables qui conditionneraient l'apparition de la corrosion. Pour cela nous allons gommer le phénomène de dérive et faire comme si les 1515Tie avaient été irradiés de façon identique aux 316Tie.

II.2.3. Les aciers restent cependant comparables

Pour supprimer l'effet de la dérive, on pourrait imaginer de refaire tout simplement l'analyse en supprimant les variables qui en sont à l'origine. Mais il est irréaliste de procéder de la sorte, car le plan factoriel est le résultat *d'une vision multidimensionnelle de l'irradiation*. Les variables initiales ont toutes une partie de leur variabilité qui participe d'une manière plus ou moins importante à la création de la dérive. C'est cette part de variabilité qu'il faut supprimer pour chacune d'entre elles, et recommencer l'analyse avec toutes les variables.

Pour ce faire, nous effectuerons une Analyse Factorielle des Différences Locales [ESCO]. Pour cela on classe les assemblages en 5 types d'irradiation homogènes. A l'intérieur de chaque classe, les assemblages sont comparables, mais ils ne le sont plus lorsqu'on essaie de les comparer d'une classe à l'autre. Nous allons garder la variabilité locale de chaque paramètre d'irradiation : les assemblages deviendront alors tous comparables car ceci revient à étudier leur comportement pour une classe donnée. Techniquement, on calcule le barycentre de



Analyse des conditions d'irradiation :
le "toutes choses égales par ailleurs"

figure :10

a/ Observation des variables.(figure 10b)

Les variables température moyenne, minimale et maximale, participent encore à l'explication de l'inertie.

De nouvelles variables sont mises en évidence. On notera particulièrement la température de début d'irradiation (dans la direction de la première bissectrice) et le taux de combustion corrélé à d'autres variables de durée de vie totale (jepp_cumulés, dpa_cumulés) caractéristiques de la seconde composante. Il est important de constater que la variable taux de combustion joue un rôle important dans l'explication de

l'inertie uniquement lorsqu'on raisonne "toutes choses égales par ailleurs" (absence de cette variable sur le plan caractéristique des dix dernières années (cf figure 8b)).

b/ Observation des individus (figure 10a)

Les individus qui ont subi une irradiation moyenne dans leur classe d'appartenance, se projettent au centre du plan. Les autres s'en écartent d'autant plus qu'ils seront caractérisés par les variables citées précédemment.

Sur le plan factoriel, on s'aperçoit effectivement de la disparition de la dérive. Des individus éloignés dans l'absolu, peuvent se retrouver très proches en relatif. Par exemple, le Dci3104 (Papeete1) a été irradié selon une forte sollicitation en température par rapport aux autres assemblages de sa classe (citons le Cpb0436). Il se situe tout proche du Dci3122 qui a été également irradié selon une sollicitation plus forte en température par rapport aux autres assemblages de sa classe (citons le Dci2106 (Nestor4)).

Remarque :

les quatre assemblages précédents sont bien projetés sur le plan.

Ces observations sont très importantes. Car le Dci3104, d'acier 316Tie, *présente une corrosion du type d'un 1515Tie* (cf position sur figure 7 : Rog et Riff), et nous venons de constater que son comportement relatif est très proche d'un 1515Tie. Inversement, le Dci2106, d'acier 1515Tie, *présente une corrosion du type d'un 316Tie* (cf position sur figure 7) et son comportement relatif est proche d'un 316Tie (cf figure 7). Ainsi, l'acier n'est pas à prendre en compte dans l'explication de la corrosion. Celle-ci est directement conditionnée par l'évolution de certaines variables d'irradiation. Après l'apparition, l'évolution vers de très fortes intensités se fait (ou ne se fait pas) selon les conditions d'irradiation propres à chaque assemblage : dans le cas du Dci3104, beaucoup d'aiguilles sont atteintes par la ROG et la RIFF, sa température a été élevée durant toute son irradiation (figure 11a) comme pour la plupart des 1515Tie. Mais l'intensité de la corrosion observée est faible.

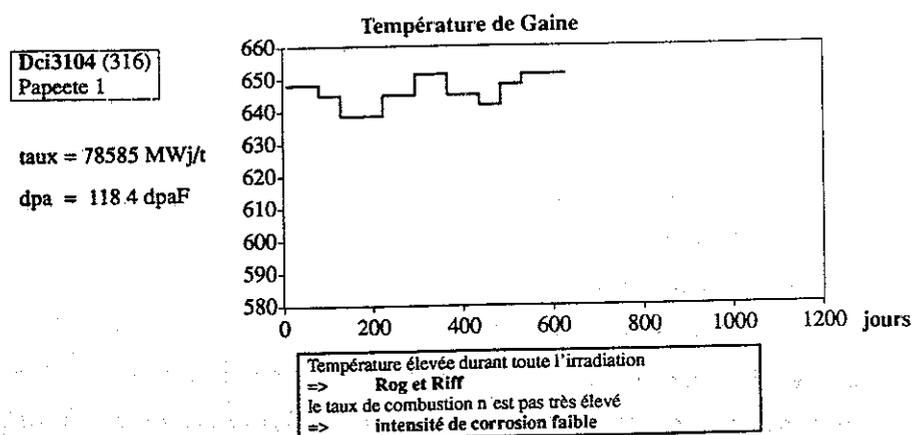


figure : 11 a

On peut avancer comme hypothèse que cela est dû au très faible taux de combustion de cet assemblage (78585 MWj/t)

Les idées commencent à se préciser pour un éventuel modèle

II.3. Croisement des deux analyses : observation cas par cas

Nous allons maintenant analyser le lien entre la corrosion des assemblages et leur irradiation dans PHENIX. Pour cela, regardons si deux assemblages qui étaient *proches dans l'espace d'irradiation* le restent dans *l'espace de corrosion*. Si c'est toujours le cas, il y aura association parfaite entre les classes de corrosion et d'irradiation. Pour matérialiser cette remarque, nous utilisons un tableau à double entrée dont les colonnes représentent les 5 classes de corrosion et les lignes les 5 classes d'irradiation. A l'intersection d'une ligne et d'une colonne, on indique le nom de l'assemblage (figure 12).

CONFRONTATION DES ETUDES REALISEES INDEPENDEMMENT L'UNE DE L'AUTRE
IRRADIATION - CORROSION

PARTITION OBTENUE DANS L'ESPACE DE LA CORROSION

	1	2	3	4	5
1	CPE0462 CPA0435 CPB0436 CPD0465 DCI0106 DCI2101 CPB0445 CPA0394 DCI2102	CPD0455 CPD0360 CPA0381 DCI3104	0	0	CPA0481
2	0	0	DCI3116 DCI3117 DCI3203	0	DCI0107 DCI3204
3	0	DCI2106	0	DCI2105 DCI3122	DCI3106
4	0	0	CPA5018 DCI0111 CPA5024 CPB0610 DCI0113	CPA5032	0
5	CPE6008 DCI0208	0	CPD6004	CPE6017	CPD6023

PARTITION OBTENUE DANS L'ESPACE DE L'IRRADIATION

figure : 12

Quelques coefficients d'association.
Chi_deux = 32.34
Phi_deux = 0.95
T de Tschuprow = 0.48
C pearson = 0.78 (tend vers 1 pour une association parfaite)

Nous ne parlerons que des assemblages qui vont constituer nos points de référence pour appuyer notre modèle de corrosion (se reporter à [PANT] pour une discussion plus détaillée de chaque assemblage)

Le nombre important de cases égales à zéro nous permet de dire qu'il y a bien association (on peut éventuellement quantifier l'association par des indicateurs statistiques) appuyant ainsi une recherche de relation de cause à effet. Seule la dernière ligne dépareille mais elle n'est constituée que d'assemblages ayant subi des irradiations très particulières.

L'observation du tableau fait apparaître **trois classes principales** de corrosion ordonnées selon un degré de sollicitation de plus en plus important en phase avec l'évolution historique des conditions d'irradiation dans PHENIX : le groupe des 316Tie, un groupe intermédiaire de 1515Tie et les 1515Tie de fin d'expérimentation.

Essayons maintenant d'expliquer le décalage de certains assemblages. Ce décalage intervenant par rapport à la structure de base fixée par la dérive, **nous orienterons nos observations cas par cas selon les variables apparues lors du "toutes choses égales par ailleurs" (Analyse Factorielle des Différences Locales).**

- La corrosion du Cpa5032 s'explique par l'observation du début d'irradiation (figure 11b)

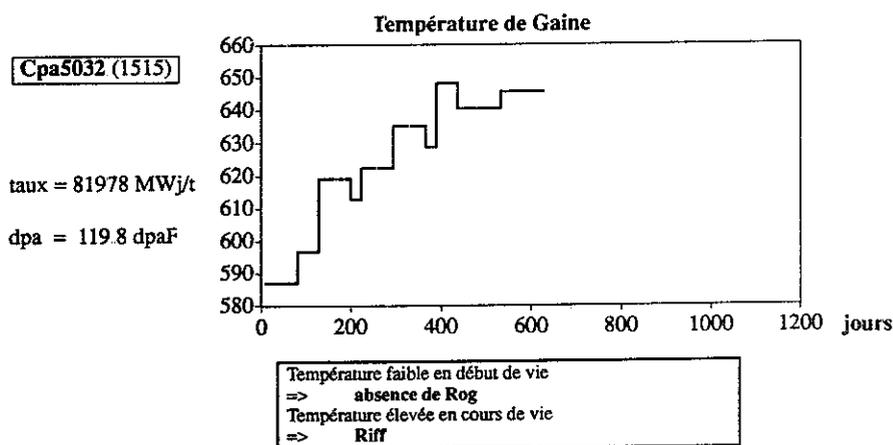


figure : 11 b

En effet, cet assemblage est le seul à avoir subi une forte vaccination en température (augmentation très progressive en début de vie) : nous observons une absence totale de Rog. La présence de Riff peut s'expliquer par le passage en cours de vie à forte température (au delà de 640° figure 11b); d'où la forme creusée de son histogramme de corrosion (cf. figure 7)

- Le très peu de Riff observée dans l'assemblage en 1515Tie Dci2106 (Nestor 4) consolide l'hypothèse d'absence d'effet du type d'acier. Sa température d'irradiation basse pendant presque tout son temps en réacteur (figure 11c) diminue l'orientation de la corrosion vers de la Riff. Et bien qu'il ait été mené à un taux de combustion élevé, son degré de corrosion s'avère faible par rapport à l'ensemble de l'échantillon : il a subi une moins forte sollicitation en température en début d'irradiation par rapport aux autres assemblages.

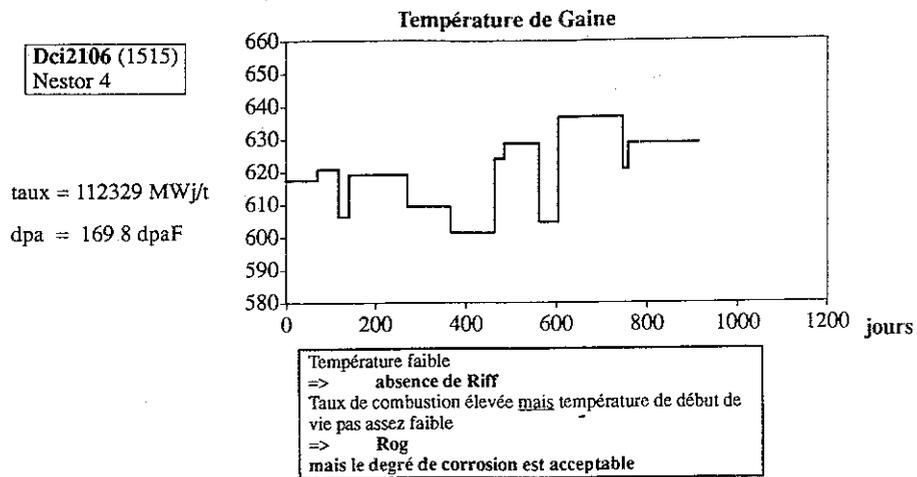


figure : 11 c

Son taux étant un des plus élevés de l'échantillon, il confirme le rôle primordial de la température. C'est ainsi que l'on s'est aperçu de l'importance cruciale de cet assemblage. C'est le seul assemblage de cœur à avoir atteint un taux très important (112000 MWj/t), ne présentant aucune forte déformation, et n'ayant pas été soumis à de fortes températures. Sa corrosion étant très acceptable, il semble définir un mode d'irradiation proche des conditions optimales.

III. Conclusion

Alors que le projet d'irradiation des éléments combustibles RNR à fort taux de combustion semblait bien compromis, l'approche globale proposée par la méthodologie d'analyse de données a permis de relativiser le phénomène de corrosion et de révéler des faits marquants de notre expérimentation très porteurs d'information.

III.1. Bilan des résultats

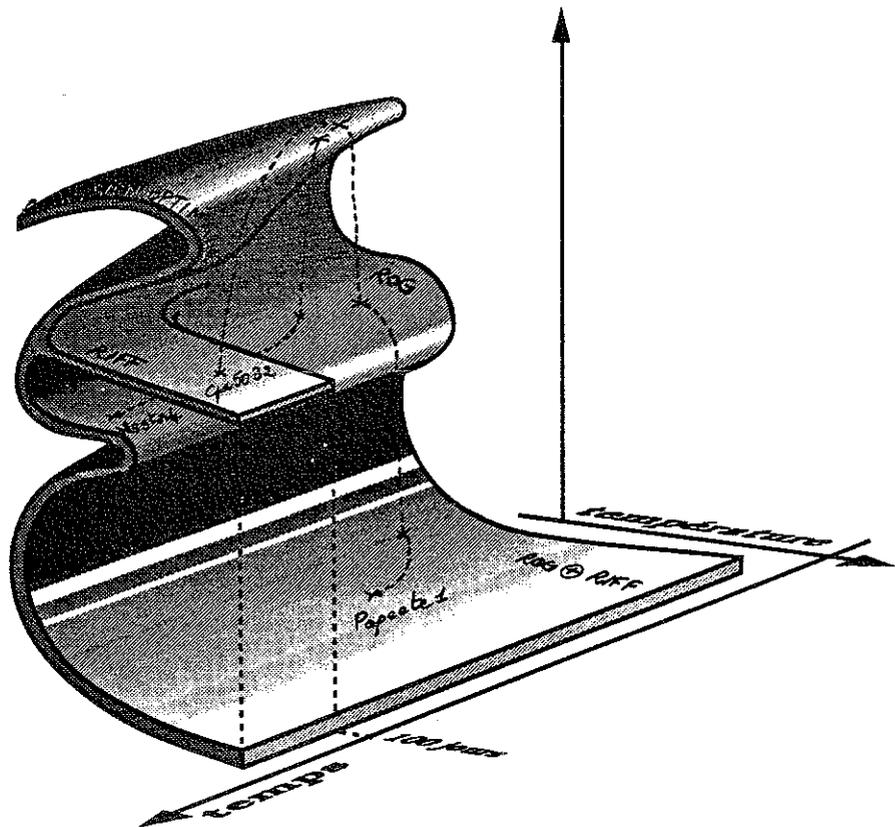
L'élaboration d'un nouvel acier permettant d'éviter les fortes déformations n'est pas à mettre en cause. La grande tendance "Riffante avec Rog moyenne" apparue avec l'expérimentation du 1515Tie est due à un changement de stratégie en ce qui concerne la conduite du réacteur qui a mené l'irradiation vers une augmentation du chahut et des températures de gaines plus élevées. Le remède à la corrosion réside dans l'évolution des paramètres d'irradiation. La température de gaine a un rôle capital :

- En début de vie, une faible température évite la corrosion de type ROG (on parlera alors de "vaccination en température")
- Pour un instant donné, tout passage au-delà d'un certain seuil (640° environ) initialise la corrosion de type RIFF

Si toutes les précautions sont prises en ce qui concerne la température, nous retombons sur le schéma classique (qui était adopté jusqu'à présent) qui consiste à dire que la corrosion est pilotée par le taux de combustion (ie proportionnelle à la durée de vie) [ROUA]

III.2. Le modèle proposé.

Nous utiliserons une des formes géométriques issue de la théorie des catastrophes [THOM], ou plus exactement une "fronce" modifiée (figure 13) pour effectuer le recalage de nos observations.



VUE EN COUPE DE LA SURFACE DE CORROSION :
Orientation de la corrosion selon les caractéristiques d'irradiation en début de vie.

figure : 13

Il n'y a bien sûr aucune référence à la théorie en ce qui concerne notre démarche, si ce n'est le fait que notre intention a été de proposer une représentation graphique pour véhiculer au mieux les sentiments que nous avons eus au long de cette étude. Cette représentation nécessite de la part d'une personne extérieure à l'étude un léger effort de compréhension, pour en retour lui donner la possibilité immédiate de se faire une opinion sur les idées avancées.

Il faut imaginer les assemblages se déplaçant sur la surface de corrosion (figure 13) en fonction de l'évolution des paramètres taux de combustion et température.

On comprend alors que :

- La RIFF est conditionnée par un passage à forte température à un instant quelconque de la vie d'un assemblage.

- La nécessité d'effectuer une vaccination en température (évolution progressive en début d'irradiation) pour éviter à un assemblage de "chuter" vers un état de corrosion plus pénalisant ("ROG uniquement" ou bien "ROG et RIFF")
- Le caractère d'irréversibilité qu'accompagne tout changement d'état de corrosion (le taux de combustion ne pouvant qu'augmenter et la température étant bornée inférieurement)
- Les seuils en température à ne pas dépasser ne sont pas apparus avec la clarté de critère en tout ou rien. Les formes rondes de cette représentation illustrent une notion de rapprochement de frontière au-delà de laquelle l'état d'irréversibilité est atteint, le "glissement" vers cet état, au fur et à mesure qu'on s'en approche et que la pente augmente, pouvant être conditionné par des phénomènes du deuxième ordre, probablement mal décrits

On peut suivre alors la vie des trois assemblages, révélés par l'analyse statistique, qui nous ont donné l'idée de mettre en place ce modèle (cf. condition d'irradiation du Dci3104 (Papeete1), Cpa5032 et Dci2106 (Nestor4) figure 11 a, b et c)

Celui-ci sera utilisé pour orienter les futures irradiations

Bibliographie

- [BORG] **BORGNAT G. (1989)** "Diagnostic automatique de corrosion sur aiguilles irradiées" Projet de fin d'études, U T C
- [CORN] **CORNU B., PANTERA L. (1992)** "Corrosion interne des gaines PHENIX : Synthèse d'une étude d'analyse de données", note CEA DEC/SDC/LCND 92-2004
- [CONT] **CONTROLE NON DESTRUCTIF par Courants de Foucault - Niveau 3 CAST- INSA Villeurbane**
- [ESCO] **ESCOFIER B., BENALI H. (1990)** "Analyse factorielle lissée et analyse factorielle des différences locales" R S A ,1990,XXXVIII (2),55-76
- [CAUS] **DROESBEKE J.J, FICHET B., TASSI P.** "Modèles pour l'analyse des données multidimensionnelles", éd. Economica 1992, Caussinus p 256
- [MCCU] **MC CULLOCH C-E., MEETER D. (1983)** "Discussion about outliers" Technometrics vol 25, n°2, May 1983
- [MARS] **MARSOL R. (1986)** "Expertise automatique de défauts détectés par courants de Foucault sur des aiguilles irradiées" Thèse U T C.
- [PANT] **PANTERA L. (1992)** "Application d'une méthodologie statistique à la compréhension du phénomène de corrosion sur aiguilles irradiées dans le réacteur PHENIX" Thèse U T C .
- [ROUA] **ROUAULT J., PIRON J-P. (1987)** "La corrosion des gaines dans PHENIX" note C.E.A DEC/SDC
- [THOM] **THOM R.** "Paraboles et catastrophes" Champs Flammarion

