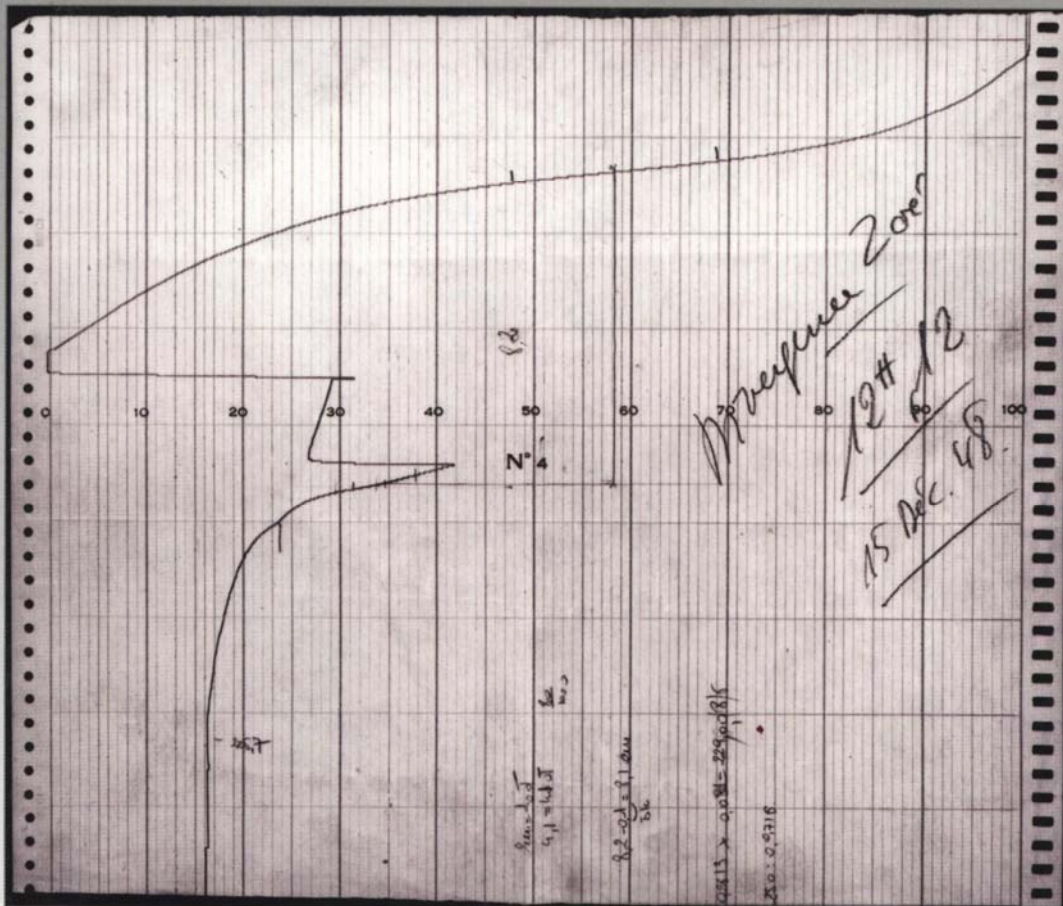


Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

e-den

Une monographie de la Direction
de l'énergie nucléaire

L'instrumentation et la mesure en milieu nucléaire



EDITIONS
LE MONITEUR



Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

e-den

Une monographie de la Direction
de l'énergie nucléaire



2-539-89-1

L'instrumentation et la mesure en milieu nucléaire

EDITIONS
LE MONITEUR



Table des matières

Préface	7
Introduction	9
L'instrumentation et la mesure : une discipline scientifique transversale de plus en plus présente dans des systèmes de plus en plus complexes	9
L'instrumentation mise en œuvre pour les applications industrielles de l'énergie nucléaire : une instrumentation soumise à de rudes conditions	10
L'instrumentation et la mesure pour les réacteurs nucléaires de puissance	17
La mesure des rayonnements	19
Les chambres à ionisation et compteurs proportionnels	21
Les chambres à fission	22
Les collectrons (SPND)	23
La dosimétrie en réacteur	24
Le système AMS de l'EPR	27
Le programme de suivi de l'irradiation (PSI) de la cuve du réacteur	27
L'auto-dosimétrie	28
Les mesures thermiques et thermohydrauliques	31
Les mesures de température	31
Les mesures en cœur	31
Les mesures hors cœur	32
Les mesures de pression	32
Les mesures de débit	33
Encadré : La mesure de débit par organe déprimogène	33
Les innovations	34
La métrologie ultrasonore	34
La métrologie par fibre optique	35
Le stratimètre	35
Les mesures chimiques	37
Encadré : Le pH, potentiel E_h et diagrammes potentiel-pH	37
Les mesures en continu	39
Les mesures en discontinu	40
Les perspectives : vers des instruments plus robustes, utilisables en ligne et <i>in situ</i>	40
Mesures électrochimiques du pH et du potentiel redox	40
Les optodes pour la mesure du pH	42
Les mesures mécaniques	43
Introduction	43
Les essais mécaniques Charpy et mini-Charpy	44
Les essais de ténacité sur petites éprouvettes (CTR)	45
Les essais de flexion ou traction sur mini-éprouvettes	46
Les essais Small Punch Test (SPT)	47
Les essais de micro ou nano-indentation	48
Les essais de compression par micro-piliers	48
La boucle de corrosion en conditions REP	48



L'instrumentation et la mesure pour la sûreté, la prévention et la gestion des accidents graves	51
L'instrumentation actuellement en œuvre sur le parc des réacteurs nucléaires français	51
L'instrumentation mise en œuvre par le CEA sur ses programmes dédiés aux études sur les accidents graves	53
<i>La plateforme PLINIUS, dédiée à l'étude du corium</i>	53
<i>Le laboratoire VERDON, dédié au terme source</i>	57
Encadré : Les détecteurs à scintillation	60
L'instrumentation et la mesure pour les réacteurs de 4^e génération	65
Besoins, enjeux et motivations	65
Les mesures ultrasonores	65
<i>Les techniques et procédés</i>	66
Encadré : L'imagerie acoustique pour les besoins des RNR-Na	69
<i>Les capteurs de mesure</i>	71
<i>La simulation de propagation acoustique avec la plateforme CIVA</i>	72
Les mesures électromagnétiques par courants de Foucault pour le contrôle en réacteur	73
Les mesures chimiques et radiochimiques	74
<i>La mesure de la qualité du sodium</i>	75
<i>La mesure de la qualité du gaz de couverture (LIBS)</i>	77
<i>La mesure du tritium</i>	78
La détection des fuites (Na, H₂O, gaz)	78
Les mesures par fibres optiques / Réseaux de Bragg (détection fuite sodium et gaz)	79
Le cas spécifique du démonstrateur ASTRID	81
<i>La surveillance en exploitation</i>	82
<i>L'inspection périodique</i>	82
Encadré : L'industrialisation d'un instrument de mesure	83
<i>La réparation</i>	84
Conclusions	84
L'instrumentation et la mesure pour les réacteurs expérimentaux	87
L'instrumentation et la mesure pour les maquettes critiques	89
Contexte et besoins en neutronique expérimentale	89
Maquettes critiques et expériences intégrales	89
Les différents types d'instrumentation pour les expériences dans les maquettes critiques	90
<i>Les mesures par chambres à fission</i>	91
Encadré : Un nouvel instrument pour la mesure neutronique des réacteurs : les détecteurs micromégas	92
<i>Les mesures par spectrométrie gamma (gamma-scanning)</i>	93
<i>Les mesures d'échauffement nucléaire par détecteurs luminescents</i>	94
Quelques exemples d'utilisation de l'instrumentation	95
<i>La mesure de la fraction effective de neutrons retardés par oscillation</i>	95
<i>La mesure en ligne de l'échauffement nucléaire par dosimétrie de luminescence et fibre optique</i>	96
La prise en compte de l'instrumentation dans la modélisation	98
Conclusion	98
L'instrumentation et la mesure pour les réacteurs d'irradiation de type MTR	101
Les enjeux des mesures pour les irradiations technologiques	101
Les enjeux des mesures pour les études et la qualification des matériaux sous irradiation	101
Encadré : L'irradiation aux ions et l'installation JANNUS	102
Les enjeux des mesures pour les études et la qualification des combustibles	102

L'instrumentation implantée dans les expériences en réacteur d'irradiation technologique	103
<i>Chaîne de mesure en ligne du flux de neutrons rapides</i>	106
L'intégration des mesures dans les dispositifs expérimentaux	108
<i>Dispositif de cartographie de l'échauffement nucléaire en réacteur</i>	110
La complémentarité entre les mesures en ligne et post-irradiation	111
<i>Les bancs d'examens non destructifs gamma et X immergés</i>	112
<i>Le système d'imagerie neutronique du RJH</i>	113
<i>Les capacités actuelles de mesures et d'analyses post-irradiatoires pour les études des matériaux</i>	114
<i>Mesures post-irradiation sur les combustibles en Laboratoire de Haute Activité (LHA)</i>	114
Conclusion	115

L'instrumentation et la mesure en réacteurs expérimentaux pour les études de sûreté et les études physiques	117
Le réacteur CABRI	117
<i>Objectifs scientifiques du réacteur CABRI</i>	117
<i>Description du réacteur CABRI</i>	118
<i>La caractérisation neutronique du cœur à basse puissance en configuration boucle à eau</i>	118
<i>Caractérisation thermohydraulique du cœur</i>	120
<i>Le système des barres transitoires</i>	120
<i>Mesure des hautes puissances et de l'énergie déposée au cours des transitoires RIA</i>	121
Conclusion	121
Institut Laue-Langevin – La source de neutrons européenne	121
Le Laboratoire Léon Brillouin et le réacteur ORPHÉE : la source nationale pour la diffusion de neutrons	123
<i>Le réacteur ORPHÉE</i>	123
<i>L'infrastructure de recherche LLB</i>	124

L'instrumentation et la mesure pour le cycle du combustible nucléaire 127

L'instrumentation et la mesure dans l'amont du cycle	129
Introduction	129
Encadré : La Spectrofluorimétrie Laser à Résolution Temporelle (SLRT)	129
Caractérisation du minerai, mesure de teneurs, extraction, traitement, enrichissement et fabrication	131
<i>Le phénomène Oklo</i>	131
Caractérisation de l'uranium à la mine avant extraction	131
Encadré : La spectrométrie de masse à source plasma (ICP-MS)	133
Optimisation des mesures <i>gamma</i> pour la prospection de l'uranium	133
Développement en spectroscopie optique pour l'amont du cycle	135
Instrumentation et mesure pour le contrôle de l'enrichissement de l'uranium – cas particulier de la caractérisation de l'enrichissement de l'UF ₆ en U 235	136
Les mesures physiques et chimiques sur le combustible irradié	139
Introduction	139
Les mesures post-irradiation sur les combustibles en Laboratoire de Haute Activité	139
Encadré : La spectrométrie <i>gamma</i> sur le combustible irradié	140
Analyses isotopiques et élémentaires de haute précision	143
La mesure du taux de combustion des assemblages irradiés à La Hague	143
Le contrôle des procédés pour le retraitement/recyclage	147
Quels sont les paramètres clés à contrôler pour le pilotage des procédés ?	147
La problématique des prélèvements, échantillonnages, transfert pneumatique	147

Les mesures non-destructives des échantillons : développement des méthodes K-edge et FXL	148
Le système X-hybride	148
Le système de spectrométrie de fluorescence X	149
Mesures chimiques dans le procédé de retraitement : mesures d'acidité, de compositions élémentaires (chromato), suivi du solvant	149
La problématique des effluents analytiques	151
Le contrôle du procédé de vitrification des effluents de haute activité	151
Le procédé de vitrification	151
Le contrôle du procédé	152
Le contrôle de la production des colis de verre	152
Les perspectives d'évolution du contrôle du procédé	152
Perspectives du contrôle analytique du procédé de retraitement	153
Les microsystèmes pour la chimie analytique	154
Nucléarisation de l'instrumentation	155
La chimométrie	155
L'holographie de goutte pour l'étude de l'extraction liquide-liquide	156
Encadré : Les aspects normatifs de l'analyse chimique pour les procédés du traitement-recyclage du combustible	156
Les postes de mesure du Contrôle Nucléaire de Procédé (GNP) à l'usine de retraitement de La Hague	157
Le contrôle des matières nucléaires	163
Introduction	163
Les mesures nucléaires non destructives pour le contrôle des matières nucléaires	163
La calorimétrie pour le contrôle des matières nucléaires	164
Le contrôle des rétentions de matière en boîtes à gants et cellules blindées	165
Encadré : Les matériaux de référence pour le contrôle des matières nucléaires	167
Encadré : La dilution isotopique	168
La caractérisation des déchets radioactifs	169
Les mesures non destructives passives	171
Introduction	171
La spectrométrie <i>gamma</i>	171
Application n° 1 : la mesure globale de conteneurs de déchets	172
Application n° 2 : les mesures segmentées, la tomographie d'émission	173
Application n° 3 : la mesure de déchets « sur pieds »	173
La mesure neutronique passive	174
L'autoradiographie digitale sur déchets	176
L'analyse des gaz	177
Les mesures non destructives actives	179
Introduction	179
L'imagerie photonique à haute énergie	179
L'interrogation neutronique active	181
La méthode de mesure des neutrons prompts	181
La méthode de mesure des neutrons retardés	182
Dosage des actinides par Interrogation Photonique Active (photofission)	182
Détection de rayonnements <i>gamma</i> prompts d'activation neutronique	184
Les mesures destructives pour la caractérisation des colis de déchets	187
L'expertise destructive et le prélèvement d'échantillons	187
L'analyse sur échantillons	188
Les échantillons de l'enveloppe du colis	188
Les échantillons de déchet	190

193	La combinaison des méthodes de mesure	193
	Encadré : L'installation CHICADE	
194	(CHimie pour la CAractérisation des DEchets)	194
196	La caractérisation des colis d'enrobés bitumineux	196
199	Perspectives	199

L'instrumentation et la mesure pour l'assainissement et le démantèlement 201

203	La spectrométrie <i>gamma</i> appliquée à la caractérisation d'objets	203
	issus des chantiers d'assainissement-démantèlement-déclassement	
203	La spectrométrie <i>gamma</i> à température ambiante, cas des cristaux CdZnTe	203
204	La méthode de « <i>gamma-scanning</i> » d'équipements radioactifs	204
205	La méthode de « <i>gamma-scanning</i> » appliquée à un composant	205
	périphérique du cœur du réacteur PHÉNIX	
206	La mesure de la profondeur de contamination radioactive des bétons	206
	au moyen du ratio Pic / Compton	

209	L'imagerie <i>gamma</i> et <i>alpha in situ</i> pour l'assainissement-démantèlement	209
	des installations nucléaires	
209	La <i>gamma</i> caméra	209
210	Description technique de la <i>gamma</i> caméra à masque codé	210
213	Exemple d'utilisation de la <i>gamma</i> caméra pour la localisation	213
	de points chauds en 3D, suivi d'assainissement	
214	L' <i>alpha</i> caméra	214

217	Le couplage des méthodes de mesures nucléaires <i>in situ</i>	217
	pour l'assainissement-démantèlement-déclassement	
218	Le couplage de méthodes de mesures nucléaires <i>in situ</i> :	218
	exemple de caractérisation de l'état radiologique des cuves	
	de Stockage de Produits de Fission (SPF)	
219	Les investigations radiologiques par sonde à fibre optique	219
	à luminescence optiquement stimulée	

221	La spectroscopie de plasma induite par laser (LIBS)	221
221	Principe et caractéristiques de la technique LIBS	221
222	Configurations instrumentales et exemples de mises en œuvre	222

225	L'instrument de contrôle de la non-rétrodiffusion des aérosols	225
226	Conclusion	226

227	Instruments pour la caractérisation des sites nucléaires accidentés	227
-----	--	-----

L'instrumentation, la mesure et l'analyse pour la protection de l'homme et de l'environnement 231

233	Mesure des faibles doses et détection des traces de radioactivité	233
233	Analyse de traces dans l'environnement	233
234	Encadré : La géostatistique	234
234	Encadré : La spéciation	234
235	La spectrométrie <i>gamma</i> à haute résolution pour la cartographie de sites	235
235	Encadré : La spectrométrie <i>gamma</i> appliquée à l'environnement	235
235	Les mesures sur sites accidentés et la cartographie <i>gamma</i>	235
235	Les systèmes HÉLINUC et AUTONUC pour la cartographie <i>gamma</i> de sites	235
237	Le tritium dans l'environnement : spéciation et analyse	237
238	Encadré : Tritium organiquement lié	238
238	Encadré : L'analyse du tritium	238
239	Mesure de la teneur en hydrogène d'échantillons dans l'environnement	239



Détection et mesure de rejets et d'effluents liquides et gazeux	243
L'impact de l'évolution réglementaire sur les méthodes et les outils mis en jeu	243
Le suivi des émissions atmosphériques de gaz et particules	244
Le suivi des rejets dans les milieux liquides	246
Les contrôles de sécurité et de non-prolifération	249
Introduction	249
L'imagerie X en rétrodiffusion pour l'analyse de colis suspects	249
Les portiques radiologiques passifs	251
Optimisation du contrôle non intrusif dans les conteneurs maritimes	253
La détection neutronique de matières illicites avec la technique de la particule associée	254
La détection de matière nucléaire dans les conteneurs de transport par photofission	255
La spectroscopie sur plasma induite par laser	256
Les mesures isotopiques de l'uranium et du plutonium	257
Encadré : Le système des garanties de l'AIEA	258

Conclusion

Conclusion	263
-------------------	------------

Glossaire – Index	267
--------------------------	------------

Alors que le nucléaire civil connaît un véritable regain d'intérêt, il faut savoir aussi exactement que possible de quoi on parle, qu'il s'agisse du nucléaire proprement dit ou des sciences et techniques qui lui sont associées. Pourtant, les documents de synthèse de bon niveau scientifique sur ce type d'énergie sont rares... Pour combler cette quasi-lacune et donner à ses travaux l'éclairage qu'ils méritent, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) dresse, sous forme de courtes monographies, un tableau complet des recherches en cours dans le domaine de l'énergie nucléaire civile.

Celles-ci étant pluridisciplinaires et de nature diverse, la série de monographies du CEA explore et synthétise des thèmes aussi différents, mais complémentaires, que les réacteurs du futur, le combustible nucléaire, les matériaux sous irradiation ou les déchets nucléaires...

S'adressant à la fois à des scientifiques dont ce n'est pas le domaine de compétence, mais qui sont en quête d'information, et à un plus grand public curieux de son environnement technologique présent et futur, les monographies du CEA présentent les résultats récents de la recherche dans leur contexte et avec leurs enjeux.

L'instrumentation et la mesure en milieu nucléaire

Historiquement, les sciences nucléaires se sont développées parallèlement aux progrès de l'instrumentation pour la mesure de la radioactivité et la détection de particules. Aujourd'hui encore, l'instrumentation est une science à part entière, qui fait l'objet d'une recherche active trouvant des applications, en particulier dans l'équipement des installations nucléaires. Celles-ci demandent toute une panoplie d'instruments pour une mesure précise des grandeurs qui caractérisent leur fonctionnement. Il y va de leur contrôle, et de leur sûreté. Il s'agit d'une instrumentation spécifique puisqu'elle concerne principalement (mais pas seulement) la détection de la radioactivité, et qu'elle doit travailler en milieu hostile avec de grandes exigences d'exactitude, de robustesse et de fiabilité.

La présente monographie offre un panorama des instruments de mesure et de contrôle utilisés dans les différents domaines de l'énergie nucléaire civile, depuis les réacteurs de puissance jusqu'à la radioprotection, en passant par l'instrumentation pour les installations du cycle du combustible, la gestion des déchets radioactifs ou l'assainissement-démantèlement des installations nucléaires.

Le lecteur sera sans doute frappé par la diversité et la technicité des instruments mis en jeu, l'importance des méthodes d'assimilation de données issues de la mesure, et par l'ampleur de l'effort consacré à leur développement par la communauté nucléaire, en général, et par le CEA, en particulier.



22 €

ISBN 978-2-281-14303-4
ISSN 1950-2672



9 782281 143034