

Le projet RRADEW

Résilience aux événements radiologiques en temps de guerre

Choix de scénarios de menaces et d'attaques de sites nucléaires

P. Croüail (CEPN, France) – O. Pareniuk (ISPNPP, Ukraine)



Congrès National de Radioprotection

SFRP 2025 – La Baule

17-19 Juin 2025



Co-funded by
the European Union

Le projet RRADEW

Résilience aux événements radiologiques en temps de guerre



réponse à l'appel à projets PIANOFORTE 2023 :

« Développement d'approches d'évaluation & gestion des risques, de compétences et d'outils techniques, pour faire face à des scénarios découlant de menaces dues à des situations de guerre ou de conflits armés, en tenant compte des questions sociales, éthiques et juridiques. »

Résilience aux événements radiologiques en temps de guerre

RRADEW vise à examiner les facteurs de la **résilience sociétale** * en cas d'événement radiologique qui surviendrait en situation de guerre ou de conflit armé

- * **Définition du Cadre de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe 2015-2030** « Capacité d'un système, d'une communauté ou d'une société exposée à une catastrophe à **résister**, à **absorber**, à **s'adapter** et à **se rétablir** rapidement et efficacement, y compris par la préservation et la restauration de ses structures et fonctions essentielles »
 - **cadre général de prévention et d'anticipation** des risques, y compris ceux liés au climat et aux conflits,
 - **intégrant la gestion des risques** dans tous les secteurs : santé, urbanisme, environnement, éducation, infrastructures, ...
 - **visant le renforcement des capacités locales**, via la participation communautaire, et l'utilisation des connaissances traditionnelles et scientifiques.

Résilience aux événements radiologiques en temps de guerre

14 PARTENAIRES – 10 PAYS – PLURIDISCIPLINARITÉ

2 FÉVRIER 2024 – 31 JUILLET 2026

BUDGET 1,5 M€ (COFINANCEMENT CE 57%)



RRADEW



NMBU

NORVÈGE – Université des Sciences du Vivant



LU

SUÈDE – Université de Lund



UKHSA

ROYAUME-UNI – Agence de Sécurité Sanitaire



KIT

ALLEMAGNE – Institut Technologique de Karlsruhe



SCK-CEN, UA

BELGIQUE – Centre de Recherche Nucléaire + Université Anvers



USB

TCHÉQUIE – Université de Bohême du Sud



ISPNNP, NRCRM

UKRAINE – Institut de Sûreté et Sécurité des Installations Nucléaires + Centre de Recherche en Médecine Nucléaire

CEPN (coord.)

ASNR (LSHS),

ENSOSP



FRANCE – CEPN, ASNR, Ecole Nat. des Officiers Sapeurs-Pompiers



APA

PORTUGAL – Agence de l'Environnement



CIEMAT

ESPAGNE – Centre de Recherche Energie-Environnement-Technologie



Études de cas au Japon, Croatie, Bosnie-Herzégovine et Kosovo

- **Identifier et sélectionner des scénarios vraisemblables d'événements radiologiques en temps de guerre (à l'exclusion des attaques avec arme nucléaire)**

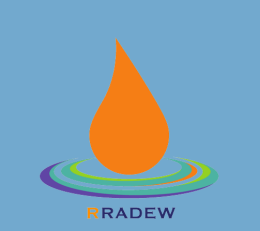
- **Identifier les facteurs, indicateurs et attributs de la résilience**
 - Etudes de cas – retours d'expériences (Ukraine, Japon, ex-Yougoslavie, Tchéquie) - Approche par type de partie prenante : population, autorités, primo-intervenants : militaires, sécurité civile, santé, ONG
 - Revue de la littérature cindynique
 - Panels de parties prenantes

- **Améliorer la préparation et de la gestion des événements radiologiques (i.e. la radioprotection) en temps de guerre**
 - Définir un cadre et proposer des outils pour intégrer la résilience dans les systèmes d'aide à la décision
 - Emettre des recommandations générales sur l'adaptation des plan nationaux existants pour la préparation et la réponse à la gestion des événements radiologiques aux situations de guerre et de conflits armés
 - critères d'évacuation, ou de confinement sur place
 - prise d'iode stable
 - mesure de la radioactivité (doses, débits de dose) et caractérisation (zonage, recherche des sources « orphelines »)
 - contremesures (ex. décontamination, restrictions)
 - Proposer des syllabus de formation à destination des primo-intervenants et autres parties prenantes

- Construction d'une matrice multidimensionnelle des scénarios possibles
 - Grille des **situations**
 - Type d'installation cible
 - Distance à la zone de conflit
 - Situations de guerre
 - Existence d'installations connexes vulnérables
 - Faisabilité de l'évacuation de la population

Grille des situations

Installation / source	Centrale nucléaire en fonctionnement	Centrale nucléaire en arrêt à froid	Stockage-entreposage de combustibles usés	Source orpheline ou stockage (de déchets par exemple)
Distance à la zone de conflit	Hors d'atteinte des moyens de destruction (ex. souterrain)	Très éloignée mais vulnérable à l'attaque aérienne	~ 50 km de la ligne de front	Sur la ligne de front
Situations de guerre	Guerre hybride (ex. cyber-attaque, drone)	Guerre de mouvement (ligne de front)	Bombardement (missiles longue distance)	Prise en otage du personnel d'installation nucléaire
Installations connexes vulnérables	« Réservoir » artificiel (barrage, etc.)	« Réservoir » naturel (rivière, mer, etc.)	Forages - Canalisations	Réseau électrique
Evacuation (faisabilité)	Evacuation non nécessaire	Evacuation obligatoire	Evacuation difficile	Evacuation impossible



- Construction d'une matrice multidimensionnelle des scénarios possibles
 - Grille des **enjeux**
 - Contexte social
 - Contexte économique
 - Enjeux militaires
 - Contexte sanitaire
 - Enjeux environnementaux et patrimoniaux
 - Communication

Grille des enjeux

Impact social	Population affectée (nb. résidents)	Population à mobilité réduite (malades, personnes âgées, orphelinats, etc.)	Plans d'évacuation d'urgence (niveau de préparation de la population)	...
Impact économique	Nombre, type et taille des entreprises vulnérables	Nombre des infrastructures (essentiels/vitales/importantes/nécessaires)	Moyens logistiques d'approvisionnement (air, rail, route, eau)	...
Enjeux et aspects militaires	Stratégie militaire	Installations nucléaires à enjeu (objectif de guerre - ressource)	Présence de mines	Formation RP des primo-intervenants
Information et communication	Médias régionaux disponibles	Plateformes informationnelles utilisées par la population	Activité internet des autorités locales et régionales	...
Impact sanitaire	Nombre d'hôpitaux, de malades	Dose estimée pour la population (zonage)	Stockages iode stable	Moyens de mesure de la radioactivité
Impact environnemental	Composition du terme-source	Débits de dose (air)	Contamination (eaux, sols)	
Impact éducatif ou patrimonial	Nombre et type d'institutions de recherches vulnérables	Nombre d'institutions éducatives dans la zone affectée (nb. d'écoles, d'élèves, d'enseignants)	Nombre de monuments historiques ou lieux d'intérêt patrimonial	

- 68 scénarios plausibles ont été sélectionnés puis « scorés » par un panel de professionnels civils et militaires en termes de vraisemblance (cf. grille des situations) et de conséquences (cf. grille des enjeux)

- ⚡ 22 scénarios à « Fort » impact (impact national-global) parmi lesquels
A : Frappe de missile sur une centrale nucléaire en fonctionnement
- ⚡ 44 scénarios le à impact « Modéré » (impact régional-local) parmi lesquels
B : Frappe de missile sur une centrale nucléaire en arrêt à froid
- ⚡ 2 scénarios à relativement « Faible » impact (impact local) : 2 scénarios dont
C : Frappe sur une installation de stockage à sec de combustibles nuc. usés

gravité →

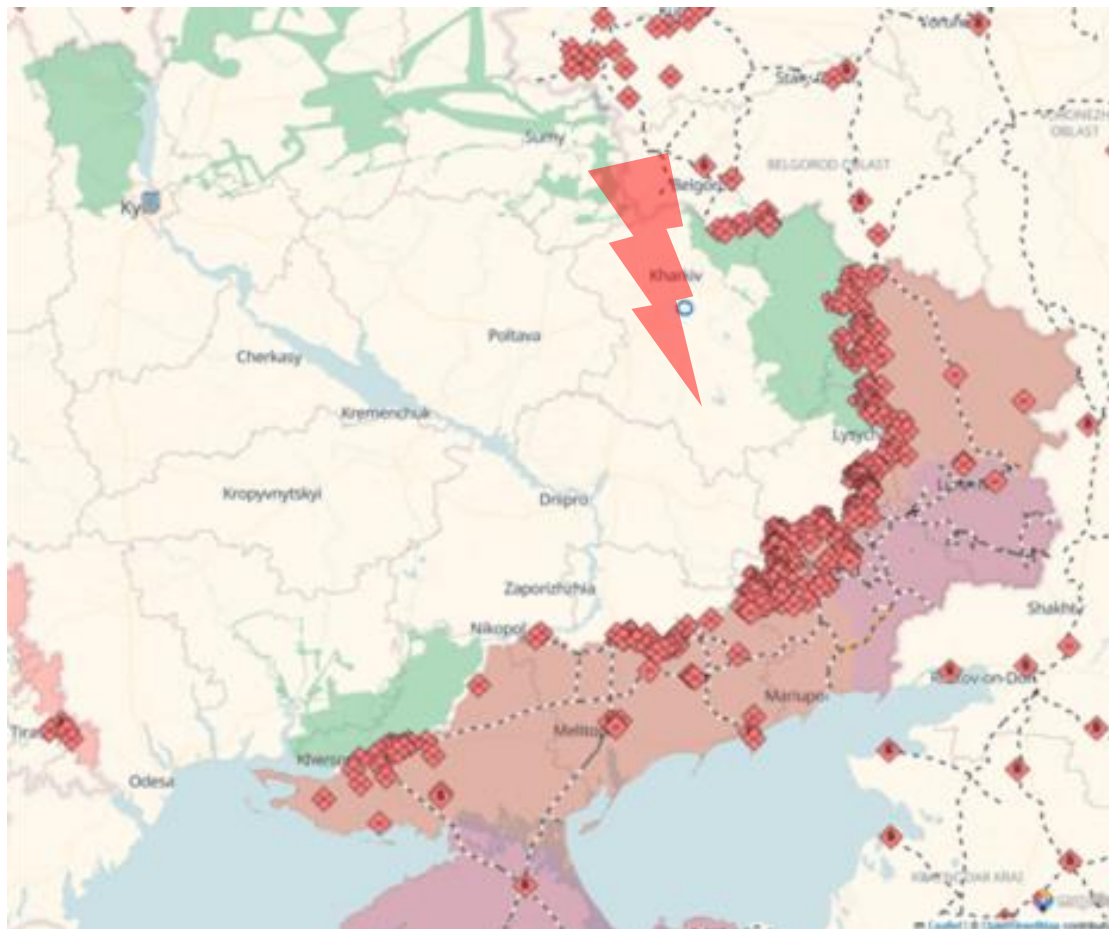
	Impact Global	Insignifiant	Mineur	Significatif	Majeur	Grave
↑ vraisemblance	Certain	⚡	⚡	⚡	⚡	⚡
	Très Vraisemblable	⚡	⚡	⚡	⚡	⚡
	Possible	⚡	⚡	⚡	⚡	⚡
	Peu probable	⚡	⚡	⚡	⚡	⚡
	Exceptionnel	⚡	⚡	⚡	⚡	⚡

Centrales nucléaires en Ukraine (et à proximité)



distance Rivne-Paris : 1700 km

- les scénarios ont été appliqués à un site fictif, en Ukraine.



- 2 réacteurs VVER-1000 MWe (type Zaporijia) placés à Birky (projet soviétique d'implantation abandonné en 1990)
- à env. 50 km au sud de Kharkiv population (2021) - 1,5 millions hab.
population (2025) - 1,2 millions hab (-20%).

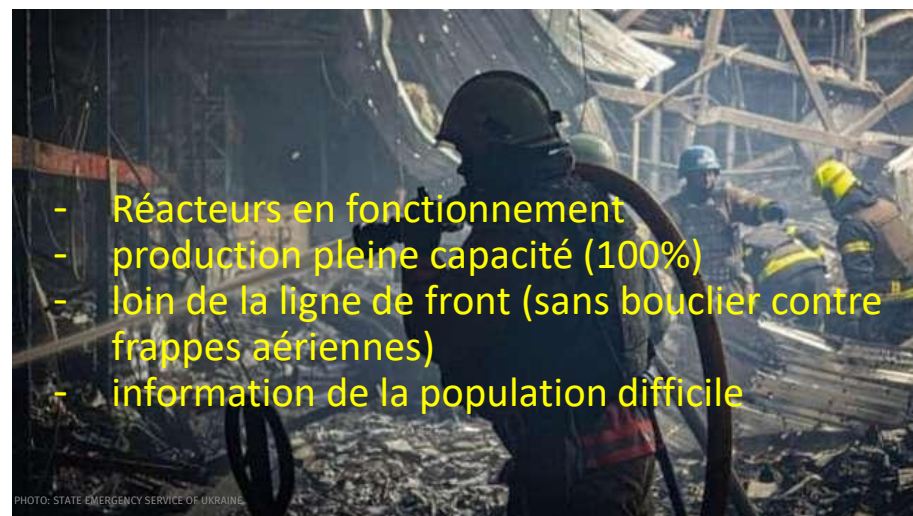
Scénario A (Impact national présumé fort)

Frappe de missile sur une centrale nucléaire en fonctionnement

- pertes de la source d'électricité externe et des diesels de secours
- 1,5% des gaines de crayons combustibles endommagées (~1 tUO₂)
- rejets 2,5 h après AU
- taux de fuite dans le circuit de refroidissement (volatils 10%, semi-volatils 1%, non volatils 0.1%)
- rupture de confinement : 100% des matières radioactives pénètrent dans l'atmosphère de l'enceinte de confinement
- rejets à la cheminée (h=100m) de 10 -100% des matières radioactives contenues dans l'enceinte

Rejets ~48 PBq (Chornobyl)(Fuku)
 Cesiums: ≤ 2 PBq (>150) (>20)
 Xe + Kr ≤ 14 PBq (>6000) (>7000)
 Iodes: ≤ 30 PBq (>5000)(>150)

- rejets pendant 1 h
- vitesse vent 1 à 2 m.s-1
- directions vent : vers une zone urbaine
- temps sec



Scénario B (Impact national présumé modéré)

Frappe de missile sur une centrale nucléaire en arrêt à froid

- défaillance de 42 (~25%) assemblages combustibles dans les 2 mois après AU
- taux de fuite dans le circuit de refroidissement (volatils 10%, semi-volatils 1%, non volatils 0.1%)
- rejets à la cheminée (h=100m) de 10 - 100% des matières radioactives contenues dans l'enceinte

Rejets (~40 PBq)

Cesiums: $\leq 36 \text{ PBq}$

Kr-85 + Xe-133 $\leq 2 \text{ PBq}$

Iodes: $\leq 1 \text{ PBq}$



- Réacteurs à l'arrêt
- à moins de 50 km de la ligne de front
- personnel pris en otage
- capacité de production réduite (50%)
- information de la population difficile

Scénario C (impact national présumé faible)

Frappe sur une installation de stockage de combustible nucléaire utilisé

- 31 assemblages combustibles stockés depuis 7 ans détruits (~13,5 tUO₂)
- taux de fuite dans l'atmosphère (volatils 50%, semi-volatils 10%, non volatils 1%)
- dispersion des matières radioactives par l'explosion dans un rayon de 100m

Rejets (~53 PBq)

Cesiums:	≤ 49 PBq
Kr-85	≤ 3 PBq
Pu	≤ 1 PBq
Iodes:	~0



- sur la ligne de front
- pendant les combats ou le passage de troupes ennemies
- capacité de production réduites ou nulles
- information de la population difficile

Figure: Zaporizhzhia NPP Dry Spent Fuel Storage Facility
(<https://www.uatorn.org/en/operating-dsfsf-at-zaporizhzhya-npp>)

- ❖ Evacuation d'urgence
- ❖ Confinement long
- ❖ Prise d'iode stable
- ❖ Restrictions de sortie
 - **Dose efficace (mSv)** évitée pendant les 2 premières semaines après l'événement
 - **Dose absorbée à la thyroïde (mGy)** évitée pendant les 2 premières semaines après l'événement
- ❖ Eloignement durable des populations
 - **Contamination des sols (Bq/m²) après dépôts** (Césium-137, Strontium-90, Plutonium-Américium)

< 1 **mSv** – aucune contremesure prévue

1-5 – restrictions temporaires de sorties (enfants) possibles

5-10 – confinement des habitants possible

10-50 – restrictions de sorties ou confinement sur place

50-500 – confinement ou évacuation

> 500 – évacuation obligatoire (sans autre condition)

20-50 **mGy** (thyroïde) – restrictions de sortie possible
sans prophylaxie iode

50-200 – prophylaxie iode (si) possible

> 200 – prophylaxie iode obligatoire

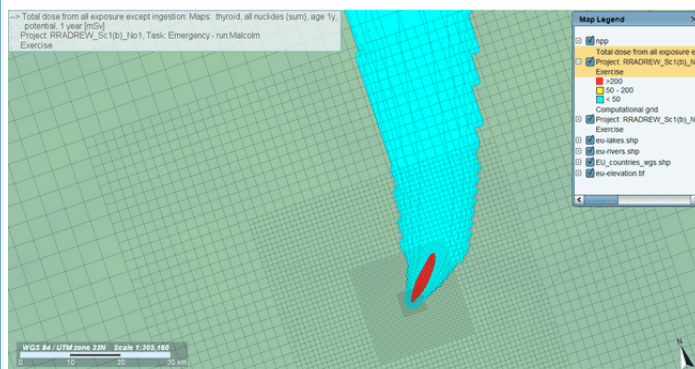
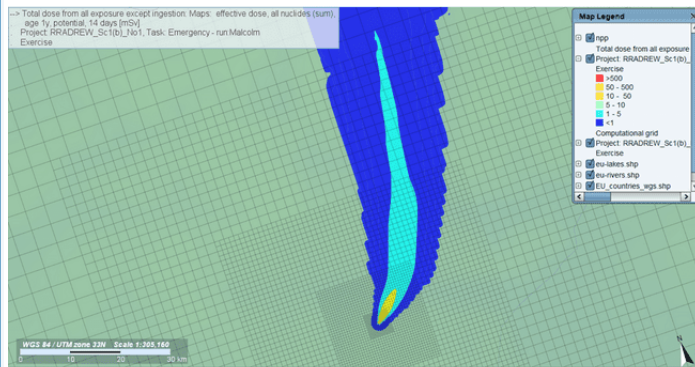
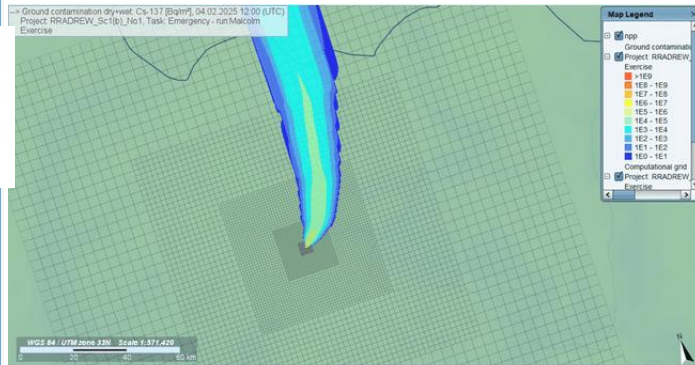
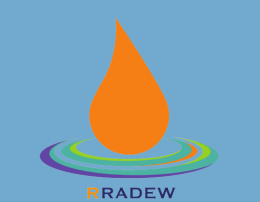
< 400 **kBq^{Cs-137}/m²** – maintien sur place de la population

400-4000 – éloignement possible

> 4000 – éloignement obligatoire

Exemple - Scénario A (Impact national présumé fort)

Frappe de missile sur une centrale nucléaire en opération



Eloignement ?

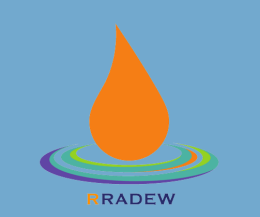
- > 400 kBq/m² – éloignement à envisager (< 3 km)
- > 4 000 – éloignement obligatoire (< 1 km)

Confinement ou évacuation ?

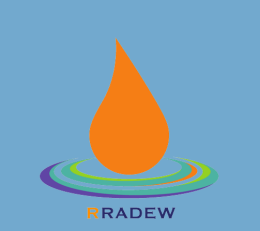
- > 5 mSv (enfant de 1 an) – Confinement à envisager (< 30 km = zone urbaine)
- > 50 mSv – Confinement obligatoire, évacuation envisageable (< 3km)

Distribution iode stable ?

Prophylaxie iode (< 11 km)



Critère	Scénario A (évacuation)	Scénario B (évac. ou confin.)	Scénario C (évac. ou confin.)
Population affectée	1 500 000	19 000 (évac.) 1 300 000 (confin.)	8 000 (évac.) 1 000 000 (confin.)
Risque mines	ÉLEVÉ	Faible	Faible (évac.) à Modéré (confin.)
Disruption du système éducatif	FORTE 282 écoles 88 000 élèves	Faible (évac.) 0 école Forte (confin.) 238 écoles 75 000 élèves	Faible (évac.) 0 école Modéré (confin.) 111 écoles 31 000 élèves
Coût éco (M€) dont Agriculture (%)	800 6 %	9 (évac.) – 611 (confin.) 48 % (é.) - 7 % (c)	2 (évac.) – 270 (confin.) 80 % (é.) - 23 % (c)
Infrastructures Bâtiments (nb) – km routes	~ 70 000 > 4 000 km	1 000 – 53 000 200 – 3 000 km	400 - 19 000 100 - 1 700 km

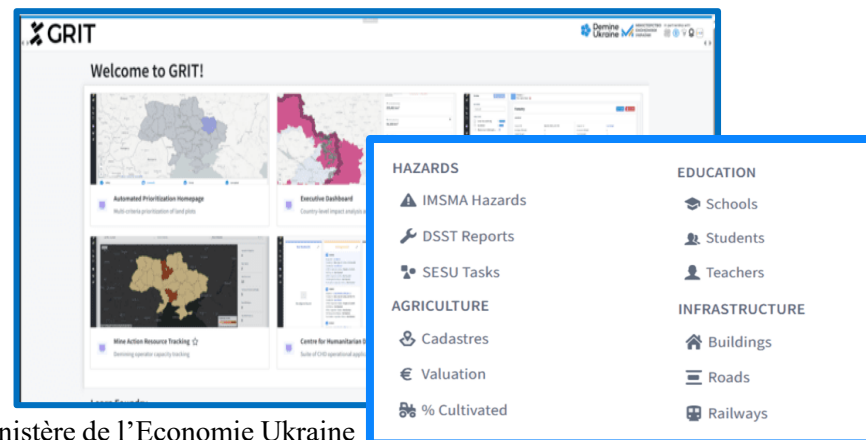


Critère	Scénario A	Scénario B	Scénario C
Difficultés gestion PA (évacuation, confinement, etc.)	Déplacements de masse de populations, risque mines, milieu urbain, risque de panique : info-com., coût	Évac. gérable (sauf pb. logistique), confin. complexe (nb.pers.), coût	Évac. facile, confin. difficile (nb.pers.) et coûteux (pertes agricoles)
Ressources - Besoins en formation de non-spécialistes RP (démoneurs, militaires, ...)	ÉLEVÉ (démontage des routes d'évac.)	Faible	Modéré. Caractérisation radiologique (si conf.)
Champ des conséquences (et efforts de communication)	NATIONAL-GLOBAL	LOCAL-REGIONAL	LOCAL (agroéconomie)

GRIT - *Ground Rehabilitation through Innovation Technologies System* - DSS développé pour déterminer les zones à prioriser les zones à déminer.

Algorithmes IA analysant **en temps réel** plus de **100 ensembles de données provenant de 26 sources**, notamment, le **cadastre**, des **images-satellites**, les zones de **combats** (images-drones), les **infrastructures** sociales (ex ERP) et économiques **industrielles** et **agricoles**, la densité de **population**, les établissements **scolaires**, les biens **patrimoniaux**, etc.

- Peut être utilisé / adapté pour prioriser les contremesures (notamment évacuation vs. confinement)



Ministère de l'Economie Ukraine
Centre Humanitaire de Déminage (Demine Ukraine)

- **Se préparer** au pire e.g. attaques de sites nucléaires :
- **Exploiter** les retours d'expériences (Ukraine, Japon, ex-Yougoslavie)
- **Scénariser** et **Modéliser** des situations accidentelles inédites (type d'installation, termes-sources, dynamique des rejets i.e. des attaques, zone touchée : urbaine vs. rurale, vulnérabilités locales)
- **Adapter** les critères radiologiques utilisés en temps de paix
- **Paramétrer** la résilience et intégrer des critères non radiologiques dans les outils d'aide à la décision, et **Tester** les nouveaux outils avec les parties en période de paix
- **Impliquer** les citoyens dans la caractérisation radiologique
- **Former** les intervenants potentiels (ex. les démineurs) et autres parties prenantes
- Définir à l'avance les messages à **Communiquer** à la population et identifier les vecteurs de l'info. : **Informer** vite et mieux et **Contrer les rumeurs**

Merci de votre attention et bienvenue !



Séminaire – Anvers 17-18 novembre 2025

Atelier final – ENSOSP, Aix-en-Provence Mai 2026