

Sujet de thèse : Modélisation et simulation d'effets cascades dans un contexte de risques naturels et technologiques : aide à la décision pour la gestion territoriale des risques et la maintenance des installations

<u>Durée de la thèse :</u>	3 ans
<u>Début :</u>	Second semestre 2025 (à définir précisément avec le (la) candidat(e))
<u>Lieu de réalisation de la thèse :</u>	GIPSA-Lab, 11 Rue des Mathématiques, 38400 Saint-Martin-d'Hères (Campus universitaire Grenoble)
<u>Encadrement :</u>	Christophe BERENGUER (UGA, G-INP, GIPSA-LAB) Jean-Marc TACNET (UGA/INRAE/IGE - ETNA)
<u>Demande d'informations ou candidature (CV, relevé de notes en Master, lettre de motivation, références et lettres de recommandation) à retourner à :</u>	christophe.berenguer@grenoble-inp.fr (Directeur thèse) jean-marc.tacnet@inrae.fr (Co-directeur thèse) françois.masse@ineris.fr (Co-encadrant) thomas.marcon@ineris.fr (Co-encadrant)

Mots clés :

Risques naturels et technologiques, effets cascade, maintenance prévisionnelle, modèles de détérioration, aide à la décision, sûreté de fonctionnement

Les phénomènes naturels se combinent parfois avec des dangers technologiques pour aboutir à des combinaisons de conséquences aggravées, inattendues. Il peut s'agir, par exemple, d'une inondation qui rend inopérant un réseau électrique causant successivement l'arrêt d'un dispositif de refroidissement, la montée en pression d'un équipement contenant des gaz toxiques ou inflammables et leur libération à l'atmosphère par déclenchement d'organes de sécurité (ex : soupapes) ou par éclatement pneumatique de cet équipement. On parle alors de risque et de scénarios NaTech. Les sites industriels (énergie, chimie, unités de transformation, matériaux, métallurgie...) sont soumis à un grand nombre de menaces et défaillances ayant des causes internes (défaillances matérielles de composants, systèmes indépendants ou en interaction, erreurs humaines) ou externes (agressions naturelles, effets dominos, défaillances de réseaux critiques). Elles peuvent impacter les équipements à risques (contenant des substances dangereuses) et leurs barrières de sécurité (proactives et réactives) mais aussi les infrastructures et systèmes de gestion des flux de matière, souvent vulnérables et dépendants des atteintes aux réseaux critiques externes (énergie, eau, communication, transport).

Des modèles de simulation intégrant des éléments stochastiques et la modélisation de phénomènes physiques sont mis en œuvre pour décrire les séquences d'événements accidentels et d'effets dominos à l'intérieur et l'extérieur d'un site industriel. Ces informations sont utilisées de manière préventive pour anticiper et se préparer à la gestion d'événements (pouvant évoluer en crise) en alimentant la conception de plans d'urgence et l'animation d'exercices. Différents dispositifs de détection, prévention et protection (techniques, humains, organisationnels) sont mis en place pour jouer le rôle de barrières de sécurité. Mais, à l'heure actuelle, l'analyse des risques technologiques pour les installations classées utilise des outils statiques qui identifient les causes unitaires et indépendantes et décrivent les scénarios comme des chemins linéaires événement initiateur et une

conséquence accidentelle potentiellement grave prenant en compte le succès ou l'échec des barrières indépendantes entre elles. Les agressions externes sont considérées soit de manière déterministe (l'installation doit résister à un phénomène de référence) soit de manière probabiliste mais sans caractériser l'intensité et la cinétique de l'évènement naturel et des défaillances technologiques induites.

Les objectifs de la thèse sont de décrire les scénarios et quantifier les risques associés aux phénomènes naturels susceptibles de générer des défaillances simultanées sur les installations technologiques et industrielles et de générer des conséquences multiples et des effets cascades. Elle s'intéresse prioritairement à la phase de d'analyse, d'évaluation et de prévention des risques en considérant a priori les séquences d'événements initiateurs et d'événements induits (les conséquences) ainsi que le comportement des différentes barrières de sécurité. La thèse est fortement connectée à des problématiques pratiques et opérationnelles. Elle ambitionne de répondre à un enjeu et un besoin fort pour élargir les modélisations et plus largement les approches de d'aide à la décision et de gestion des risques en adoptant une approche de modélisation dynamique pour considérer des scénarios de type Natech en cascade à l'échelle d'un territoire comprenant différents sites industriels, des enjeux humains, matériels et des infrastructures critiques (réseaux de transports, électriques, de communication...).

L'analyse des risques développée nécessitera de formaliser un modèle de l'installation industrielle (et à plus long terme du territoire) et d'utiliser des simulations qui intègrent la probabilité d'occurrence d'événements ainsi que la physique et la dynamique des phénomènes et de leurs effets sur les équipements et les enjeux afin d'analyser des scénarios intégrant des événements simultanés et des séquences d'événements dont on caractérisera la probabilité, l'intensité et la cinétique. La dynamique d'une crise Natech de grande ampleur sera étudiée sur un territoire exposé à des phénomènes d'inondation, de submersion, de tempête mais aussi à des épisodes de chaleur extrême. La démarche consistera à proposer :

- 1) Une méthodologie de **simulation dynamique** permettant de rendre compte les différents types de vulnérabilités de sites industriels et d'infrastructures critiques exposés à des phénomènes naturels et différentes séquences d'événements en cascades à l'échelle du site, du territoire à court terme, moyen terme et long terme ;
- 2) Développer des **méthodes** permettant d'**analyser**, de caractériser et de quantifier les **effets cascade**, les **effets système** (coût, conséquences) en prenant en compte les changements d'échelles, analysant l'adéquation échelle/méthode de modélisation pour contribuer à une **aide à la décision effective** pour mettre en place, évaluer et gérer des **barrières de sécurité**.
- 3) Il s'agira notamment a) de prioriser les actions permettant d'agir sur les composants du risque comme le danger, l'exposition, la vulnérabilité des installations notamment grâce à la mise en place de barrières de sécurité adaptées et l'adaptation des plans d'urgence ; b) de choisir les meilleurs stratégie de **maintenance** à plusieurs échelles (ouvrage, dispositifs, secteur) et enfin c) d'analyser l'effet des **dégradations** sur les **niveaux de risque** en prenant en compte la **qualité de l'information disponible et utilisée**.

Profil souhaité :

Cette thèse s'adresse à un(e) candidat(e) rigoureux(se) et curieux(se) disposant d'un ou préparant un diplôme de niveau BAC +5 minimum intéressé(e) par la recherche appliquée

transdisciplinaire dans les domaines des risques naturels, technologiques en combinant la sûreté de fonctionnement, la modélisation et la simulation numérique, et l'aide à la décision. Il (Elle) devra maîtriser les approches quantitatives d'analyse de risque et il (elle) devra être capable de concevoir et développer des outils informatiques associées aux méthodes de simulation dynamique qui seront proposées. La thèse s'inscrit dans le PEPR Risques (IRiMa) (et plus particulièrement dans son programme ciblé sur les risques NaTech), projet national d'envergure multi-partenaires¹ et fortement connecté avec le tissu industriel, les collectivités, les gestionnaires d'infrastructures. Le(a) candidat(e) devra avoir le goût pour le travail en équipe et une bonne capacité de communication. La thèse sera réalisée au laboratoire GIPSA-Lab² (Campus universitaire de Grenoble) en collaboration avec INRAE/IGE³ et l'INERIS⁴ et sera rattachée à l'École Doctorale : EEATS⁵ (Électronique, électrotechnique, automatique, traitement du signal) de l'Université Grenoble Alpes.

¹ <https://www.pepr-risques.fr/fr>

² <https://www.gipsa-lab.grenoble-inp.fr/>

³ <https://www.ige-grenoble.fr/>

⁴ <https://www.ineris.fr/fr>

⁵ <https://edeeats.univ-grenoble-alpes.fr/ecole-doctorale-electronique-electrotechnique-automatique-traitement-du-signal/ecole-doctorale-eeats-787822.kjsp>

Thesis topic: Modeling and simulation of cascading effects in the context of natural and technological risks: decision support for territorial risk management and facility maintenance

<u>PhD Duration</u>	36 months
<u>PhD Start Date :</u>	Autumn 2025
<u>PhD Location :</u>	GIPSA-Lab, 11 Rue des Mathématiques, 38400 Saint-Martin-d'Hères (Campus universitaire Grenoble) - France
<u>PhD Supervision:</u>	Prof. Christophe BERENGUER (UGA, G-INP, GIPSA-LAB) Dr. Jean-Marc TACNET (UGA/INRAE/IGE - ETNA)
<u>Contact for Information or Application</u> <u>Please send your CV, cover letter, and two references to:</u>	christophe.berenguer@grenoble-inp.fr (PhD Supervisor) jean-marc.tacnet@inrae.fr (PhD Co-supervisor) françois.masse@ineris.fr thomas.marcon@ineris.fr

Keywords: Natural and technological hazards, Cascading effects, Predictive maintenance, Deterioration models, Decision support, Dependability & System reliability

Natural phenomena sometimes combine with technological hazards to produce compounded, aggravated, and unexpected consequences. For example, a flood might disable an electrical network, which in turn causes the shutdown of a cooling system, leading to pressure buildup in equipment containing toxic or flammable gases. This pressure may trigger safety devices (e.g., relief valves) or even cause the equipment to rupture, releasing dangerous substances into the atmosphere. Such events are referred to as NaTech (Natural Hazard Triggering Technological Disasters) risks and scenarios. Industrial sites (such as those involved in energy production, chemical processes, material transformation, metallurgy, etc.) are exposed to a wide range of threats and failures. These may stem from internal causes (component malfunctions, independent or interacting system failures, human error) or external causes (natural hazards, domino effects, failures in critical infrastructure networks). These disruptions can affect hazardous equipment (containing dangerous substances), their safety barriers (both proactive and reactive), as well as infrastructure and systems managing material flows—which are often vulnerable and highly dependent on external critical networks (energy, water, communication, transport).

Simulation models incorporating stochastic elements and physical phenomena modeling are used to describe sequences of accidental events and domino effects both within and beyond an industrial site. This information is used preventively to anticipate and prepare for event management (which can escalate into crises), supporting the design of emergency plans and the organization of drills. Various technical, human, and organizational detection, prevention, and protection systems are put in place to function as safety barriers. However, current risk analysis methods for classified industrial installations typically use static tools that identify single, independent causes and describe scenarios as linear chains between an initiating event and a potentially serious accident, considering the independent success or failure of safety barriers. External hazards are considered either deterministically (the facility must withstand a reference event) or probabilistically, but without

characterizing the intensity and dynamics of the natural event or the technological failures it might trigger.

The objectives of the thesis are to develop a methodology to describe scenarios and quantify risks associated with natural phenomena that may cause simultaneous failures in technological and industrial facilities, leading to multiple consequences and cascading effects. The research will primarily focus on risk analysis, assessment, and prevention, considering a priori the initiating event sequences and their consequences, as well as the behavior of various safety barriers.

This thesis is strongly linked to practical and operational challenges. It aims to meet an urgent need by expanding existing modeling approaches and more broadly decision-support and risk management methodologies, through the adoption of dynamic modeling for cascading NaTech scenarios at the scale of a territory that includes multiple industrial sites, human and material stakes, and critical infrastructure (transportation, power, communication networks...).

The risk analysis developed will require: Formalizing a model of the industrial installation (and, in the longer term, of the surrounding territory); Using simulations that integrate the probability of event occurrence along with the physics and dynamics of phenomena and their effects on equipment and stakes, to analyze scenarios involving simultaneous events and sequences of events whose probability, intensity, and kinetics are to be characterized.

A specific focus will be placed on studying the dynamics of a large-scale NaTech crisis over a territory exposed to floods, coastal submersion, storms, and also extreme heat episodes. The approach will consist of proposing:

- 1) A dynamic simulation methodology that accounts for various types of vulnerabilities in industrial sites and critical infrastructures exposed to natural hazards and cascading sequences of events—at the site and territory scale, and across short-, medium-, and long-term time horizons;
- 2) The development of methods to analyze, characterize, and quantify cascade effects and systemic effects (costs, consequences), while addressing scale shifts and ensuring the coherence between scale and modeling approach. This is aimed at providing effective decision support for the design, assessment, and management of safety barriers;
- 3) More specifically: a) Prioritizing actions to influence risk components such as hazard, exposure, and vulnerability of installations—especially through the implementation of appropriate safety barriers and the adaptation of emergency plans; b) Choosing optimal maintenance strategies at various levels (individual facility, system, sector); c) Analyzing how degradation affects risk levels, taking into account the quality of available and used information.

Desired profile :

This PhD thesis is intended for a rigorous and curious candidate who holds or is currently completing a Master's degree (equivalent to at least five years of higher education) and is interested in applied, transdisciplinary research in the fields of natural and technological risks. The work will combine risk analysis, reliability engineering, modeling and numerical simulation, and decision support. The candidate must have a solid command of quantitative risk analysis approaches and be capable of

designing and developing computer tools associated with the dynamic simulation methods that will be proposed. The thesis is part of the national PEPR Risques (IRiMa) program⁶—specifically within its focus on NaTech (Natural-Technological) risks. This is a large-scale, multi-partner project that is strongly connected with industry, local authorities, and infrastructure managers. The ideal candidate will enjoy teamwork and possess strong communication skills. The PhD will be carried out at GIPSA-Lab⁷ (Grenoble Alpes University Campus), in collaboration with INRAE/IGE⁸ and INERIS⁹, and will be affiliated with the EEATS Doctoral School¹⁰ (Electronics, Electrical Engineering, Automatic Control, Signal Processing) at Université Grenoble Alpes.

Some references :

Serkan Girgin, Amos Necci, Elisabeth Krausmann, Dealing with cascading multi-hazard risks in national risk assessment: The case of Natech accidents, International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 35, 2019,101072, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101072>.

Giulio Zuccaro, Daniela De Gregorio, Mattia F. Leone, Theoretical model for cascading effects analyses, International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 30, Part B, 2018, Pages 199-215, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.04.019>.

Damien Serre, Charlotte Heinzlef, Assessing and mapping urban resilience to floods with respect to cascading effects through critical infrastructure networks International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 30, Part B, 2018, Pages 235-243, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.02.018>.

Tao Zeng, Guohua Chen, Genserik Reniers, Kun Hu, Resilience assessment of chemical industrial areas during Natech-related cascading multi-hazards, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 81, 2023, 104967, <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104967>.

Misuri, Alessio (2022) Development of a Comprehensive Framework for the Assessment of Technological Scenarios Triggered by Natural Events (Natech) in the Chemical and Process Industries, [Dissertation thesis], Alma Mater Studiorum Università di Bologna. Dottorato di ricerca in Monitoraggio e gestione delle strutture e dell'ambiente - DOI 10.48676/unibo/amsdottorato/10020.

Meng Lan, Paolo Gardoni, Rongshui Qin, Xiao Zhang, Jiping Zhu, Siuming Lo, Modeling NaTech-related domino effects in process clusters: A network-based approach, Reliability Engineering & System Safety, Volume 221, 2022, 108329, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108329>.

Alessio Misuri, Federica Ricci, Riccardo Sorichetti, Valerio Cozzani, The Effect of Safety Barrier Degradation on the Severity of Primary Natech Scenarios, Reliability Engineering & System Safety, Volume 235, 2023, 109272, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109272>.

⁶ <https://www.pepr-risques.fr/fr>

⁷ <https://www.gipsa-lab.grenoble-inp.fr/>

⁸ <https://www.ige-grenoble.fr/>

⁹ <https://www.ineris.fr/fr>

¹⁰ <https://edeeats.univ-grenoble-alpes.fr/ecole-doctorale-electronique-electrotechnique-automatique-traitement-du-signal/ecole-doctorale-eeats-787822.kjsp>

Qiuhan Wang, Mei Cai, Guo Wei, A scenario analysis under epistemic uncertainty in Natech accidents: imprecise probability reasoning in Bayesian Network, Environmental Research Communications, jan 2022, Volume 4(1), 015008, 10.1088/2515-7620/ac47d4

Dong S, Yu T, Farahmand H, Mostafavi A. Bayesian modeling of flood control networks for failure cascade characterization and vulnerability assessment. Comput Aided Civ Inf. 2020; 35: 668–684. <https://doi.org/10.1111/mice.12527>

Fekete A. Critical infrastructure cascading effects. Disaster resilience assessment for floods affecting city of Cologne and Rhein-Erft-Kreis. J Flood Risk Management. 2020; 13:e312600. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12600>

Cai, M., Gao, Y., Yang, C., Xiao, J., & Wang, Q. (2023). Social vulnerability assessment for an industrial city in Natech accidents: A Bayesian network approach. Civil Engineering and Environmental Systems, 40(1–2), 32–49. <https://doi.org/10.1080/10286608.2023.2211516>

A. Dehghanisani, N. Khakzad, E. Salzano, P. Amyotte, Can. J. Chem. Eng. 2024, 102(10), 3333. <https://doi.org/10.1002/cjce.25349>