

Etude expérimentale et numérique pour l'identification et la classification des ruptures dans la chaîne du froid

Directeur de thèse : Antoine Cornuéjols, UMR MIA-Paris, AgroParisTech- Inra, Université Paris Saclay

Co-directeur de thèse : Onrawee Laguerre, Unité Génie des Procédés Frigorifiques, Irstea, Antony

Encadrement Irstea : Steven Duret, Hong-Minh Hoang.

Contact : Steven Duret, steven.duret@irstea.fr

La chaîne du froid est un réseau logistique complexe dont l'objectif est d'acheminer aux consommateurs des denrées périssables dans de bonnes conditions hygiéniques, nutritionnelles et organoleptiques. L'intérêt du terme chaîne est de souligner l'importance de la continuité des étapes ; aucun maillon de la chaîne (entrepôts, véhicules, équipements...) ou transfert entre maillons ne devant « céder » et ainsi anéantir l'effort général mis en place pour garantir un produit préservé de tout échauffement non maîtrisé au moment de la consommation. Cependant, plusieurs études de terrain réalisées par l'unité Génie des Procédés Frigorifiques d'Irstea avec des capteurs de température placés dans des produits alimentaires montrent des remontés rapides de températures caractéristiques de ruptures dans la chaîne du froid. Ces ruptures sont principalement liées aux contraintes logistiques associées à tout circuit de distribution, notamment lors du transfert des produits d'un maillon à un autre. Par exemple, les produits peuvent rester sur un quai de déchargement d'un magasin ou à l'extérieur lors de leur livraison en attendant d'être pris en charge par les opérateurs. L'évaluation et la maîtrise des conditions dans lesquelles ces ruptures se produisent (température de l'air environnant, durée, position des produits impactés dans un carton ou une palette) et leurs impacts sur la température des produits (vitesse de réchauffement, niveaux de température atteints par les produits) représentent ainsi des enjeux de sécurité alimentaire (sûreté et gaspillage), économiques et environnementaux. Malgré ces enjeux, les conditions opératoires dans lesquelles ces ruptures se produisent et leurs impacts sur les produits sont mal connus des professionnels et des pouvoirs publics. En effet, ces phénomènes sont difficiles à observer sur le terrain car le comportement des opérateurs peut être modifié par la présence d'un observateur.

L'objectif de cette thèse est de développer des méthodes d'apprentissage automatique permettant de diagnostiquer des ruptures dans la chaîne du froid (de l'usine au consommateur) et d'évaluer leurs impacts sur les qualités des aliments et sur les consommations énergétiques.

I- Comme il est difficile d'avoir accès directement aux conditions externes (ou conditions opératoires) d'une chaîne du froid (température de l'air environnant, durée, position des produits impactés dans un carton ou une palette, vitesse d'air), mais que l'on peut disposer de capteurs à proximité des produits alimentaires, *la première tâche consiste à chercher à inférer ces conditions externes, et leurs évolutions, en particulier lors des ruptures, à partir d'une série de mesures de température réalisées sur les produits le long de la chaîne du froid.* Il s'agit d'une certaine façon d'un problème d'ingénierie inverse. Le premier objectif du travail de thèse consistera à utiliser des méthodes d'apprentissage automatique pour inférer la présence et la succession la plus probable de ruptures de chaîne du froid à partir de séquences de mesures réalisées sur les produits alimentaires. Pour ce faire, on partira de séquences de mesures obtenues en milieu contrôlé en laboratoire (température de l'air environnant,

durée, position, vitesse d'air) pour lesquelles les conditions externes et les mesures sur produits sont connues pour entraîner un algorithme d'apprentissage. Une fois ce modèle validé en conditions « laboratoire », il sera ensuite utilisé pour déterminer les conditions opératoires réelles des ruptures à partir de profils de températures enregistrés lors d'expérimentations sur le terrain. Ces données seront issues d'études terrain réalisées par l'unité de génie des procédés frigorifiques d'IRSTEA et consistant à enregistrer la température des produits à l'aide de capteurs placés à l'intérieur de ces produits. En effet, Irstea dispose d'une base de données de température de plusieurs types de produits réfrigérés tout au long de la chaîne du froid de l'usine au réfrigérateur domestique du consommateur. Cette base de donnée a été développée lors de précédents projets (Cemagref et ANIA, 2002-2004, Projet Européen Frisbee, 2010-2014)

Un aspect intéressant et novateur de ce premier point est que la disponibilité de modèles mécanistes à Irstea permettant de prédire l'évolution de température des produits à partir des données externes. Ainsi, la méthode d'apprentissage peut contrôler si les inférences réalisées correspondent aux conditions externes raisonnables. En effet, dans ce cas, les conditions externes inférées devraient prédire, grâce au modèle mécaniste, les mesures sur produit. Cette boucle entre apprentissage automatique pour réaliser d'ingénierie inverse et modèle mécaniste expert d'ingénierie directe est intéressante à exploiter et correspond à toute une classe de problèmes dans lesquels des modèles mécanistes directs ont été construits par les experts.

II- Une fois qu'un algorithme aura été mis au point permettant l'inférence des conditions externes de chaîne du froid et leurs évolutions, un deuxième objectif concernera le calcul de l'impact de ces conditions, avec des ruptures éventuelles, sur les qualités des produits. Ici, le modèle d'ingénierie directe pourra être utilisé. On peut noter qu'il permettra aussi de réaliser une *étude de sensibilité* qui identifiera les facteurs et les circonstances les plus critiques sur les qualités des produits (par exemple, il pourrait être plus important de contrôler la chaîne du froid en amont qu'en aval). Cette étude de sensibilité pourra être utilisée dans la méthode d'apprentissage évoquée plus haut pour déterminer les prédictions dont la précision est la plus critique par rapport à d'autres prédictions (par exemple, l'existence de rupture en fin de chaîne du froid) pour lesquelles la précision de la prédiction l'est moins.

III- Les deux objectifs cités ci-dessus supposent une analyse des données de mesures déjà existantes de la chaîne du froid. Or, les nouvelles technologies de capteurs (Internet des Objets) permettent d'envisager la possibilité de mesures avec transmission en quasi temps réel tout le long de la chaîne du froid. Dans ce cas, il peut être intéressant d'en faire une **analyse en-ligne** pour, par exemple, émettre des alertes en temps réel pour les opérateurs en cas de détection/inférence de ruptures ou d'évolutions anormales de la température au cours de la chaîne du froid. Dans cette perspective, un objectif de la thèse pourra être d'étudier les conditions d'une classification en-ligne des conditions de la chaîne du froid en cours. La méthode étudiée devra en particulier optimiser un compromis entre la confiance dans la classification (par exemple, détection d'une condition anormale) et la précocité de cette prédiction. Plus la prédiction est précoce en effet, plus le nombre de mesures sur lesquelles elle s'appuie est important et moins la confiance dans la prédiction peut être élevée. Ce problème de classification précoce est important et général, se retrouvant par exemple dans les alertes dans les services d'urgence des hôpitaux ou dans le problème de détection d'intrusion dans les réseaux informatiques. Les travaux de développés dans cet axe pourront être réalisés en collaboration avec la société francilienne Biotraq. Cette société dispose d'une plate-forme permettant de visualiser en direct la température des produits à travers la chaîne logistique.

IV- Finalement, l'ensemble des questions évoquées : ingénierie inverse avec utilisation d'un modèle mécaniste direct et classification précoce d'anomalies, seront dans un premier temps étudiées pour un type de produit alimentaire dont la rupture de la chaîne du froid a un impact important sur la qualité (par exemple, les plats préparés). Une question sera alors de voir à quel point les modèles appris par des algorithmes d'apprentissage sur les données d'entraînement concernant ce produit pourront être adaptés facilement ou non à d'autres produits pour lesquels les données seront plus rares. Il s'agit d'un problème d'**apprentissage par transfert**, très étudié actuellement dans le cadre des réseaux de neurones profonds, en particulier pour la reconnaissance d'images. Dans le travail de thèse lié à ce projet, il faudra étudier les conditions optimales pour un transfert efficace de modèle appris entre les différents produits alimentaires, et, éventuellement, pour couvrir d'autres scénarios de chaîne du froid, par exemple dans des pays dans lesquels la logistique de la chaîne du froid ou le climat sont différents.

L'objectif final applicatif est que les informations sur les conditions opératoires des ruptures puissent être utilisées dans une approche globale de la chaîne du froid développé par l'unité génie des procédés frigorifiques d'IRSTEA (approches physique, microbiologique et statistique). Cela permettra d'évaluer les impacts des ruptures sur l'évolution de la température, les qualités organoleptique et sanitaire des produits alimentaires et sur les consommations énergétiques. La méthodologie développée pourra être utilisée par les professionnels et les pouvoirs publics comme un outil d'aide à la décision dans la gestion de la chaîne du froid pour réduire le gaspillage alimentaire et les consommations énergétiques sans augmenter le risque pour les consommateurs lorsque des ruptures sont observées.