



De Saint-Pétersbourg à Miami

CHRISTIAN WALTER

Comment assurer des catastrophes infiniment coûteuses et infiniment rares ?

Le jeu de Saint-Pétersbourg est un jeu de pile ou face particulier : le lanceur, jette une pièce jusqu'à ce que «face» sorte. Quand face apparaît pour la première fois au cinquième lancé, la somme versée par le payeur au lanceur est 2^5 , soit 32 francs. Si face n'arrive qu'au dixième lancé, le gain du lanceur est 2^{10} , soit 1 024 francs.

Quel droit d'entrée le lanceur doit-il verser avant chaque partie pour que le jeu soit équitable ? Le lanceur a une chance extrêmement faible (2^{-1}) de gagner une somme extrêmement forte (2^1). Cette somme est d'autant plus grande – et plus rare – que face apparaît tard. Le gain probable du jeu n'en est pas moins... infini. Si le payeur est un casino, il devrait alors demander un droit d'entrée infini au joueur lanceur... qui ne gagnera le plus souvent que très peu ! C'est le «Paradoxe de Saint-Pétersbourg», inventé en 1713 par Nicolas Bernoulli.

Le jeu de Saint-Pétersbourg est transposable aux assurances : combien l'assuré doit-il payer pour se prémunir d'accidents très rares, mais très coûteux ? Ces grands sinistres sont des catastrophes naturelles ou des accidents industriels majeurs : tremblements de terre, cyclones, naufrages de pétroliers géants, explosions des centrales nucléaires. Les différents coûts de ces sinistres pour les compagnies d'assurance correspondent à une suite de gains du jeu de Saint-Pétersbourg, où les assurés sont les lanceurs.

Comment calculer la prime ? L'assuré ne joue qu'une seule partie, mais il y a différents assurés, chacun jouant sa partie. Il faut, en reprenant l'analogie du jeu, établir une perte moyenne pour différentes parties. Dans les jeux où l'espérance mathématique est finie, plus il y a d'assurés et plus il y a de parties, plus la moyenne des sommes à verser dues à l'occurrence d'accidents est proche de l'espérance mathé-

matique finie. C'est la prime. Dans les cas de type Saint-Pétersbourg, où l'espérance mathématique est infinie, plus le nombre des assurés augmente, et plus ils s'assurent longtemps, plus la moyenne des sommes à verser est importante. La prime est alors le coût maximal de l'assureur divisé par le nombre d'assurés.

La compagnie d'assurance doit alors, à partir des capitaux dont elle dispose, calculer le risque maximal payable, et donc le nombre maximal d'assurés possibles. Si l'assurance est obligatoire, la seule solution économique sera d'augmenter la capacité de remboursement de la compagnie d'assurance, et donc de fusionner avec une autre compagnie : c'est la logique de concentration économique des assureurs, entrevue par Paul Lévy en 1925 dans le contexte du paradoxe de Saint-Pétersbourg.

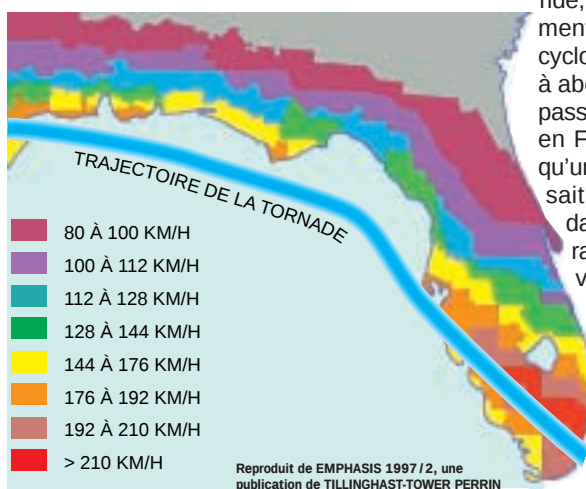
TRANSFERTS DE COÛTS

Les études récentes font apparaître une augmentation du coût des sinistres en assurance-dommages, due à l'accroissement du nombre des «catastrophes naturelles», mais aussi au manque de prudence des acteurs de la vie écono-

mique. Ainsi on observe de trop fortes concentrations urbaines dans des régions à cyclones et des constructions de mauvaise qualité dans des zones à risques sismiques. Un des rôles des compagnies d'assurance serait de facturer au juste prix le coût de la protection, afin de dissuader les constructeurs de réaliser des bâtiments insuffisamment protégés ou dans des zones à forts risques.

Des primes d'assurance qui sous-évaluent le coût réel des pertes probables reportent sur les individus avisés, les imprudences de ceux qui n'adoptent pas un comportement adapté aux risques encourus. Dans le cas d'un sinistre, les coûts seront financés par une subvention de l'État, qui se traduira par une augmentation des impôts (transfert du coût sur les autres citoyens), ou un financement par accroissement de la dette publique (transfert du coût sur les générations futures). Autrement dit, une sous-évaluation des prix encourage des comportements trop risqués. Au contraire, l'intégration du coût réel des sinistres dans les primes d'assurance fait payer à chacun le juste prix de sa conduite. Si les retraités américains tiennent à habiter le plus près possible des côtes de la Floride, les coûts de la construction des bâtiments devraient inclure les risques de cyclones. Les actuaires de Floride ont eu à aborder toutes ces questions après le passage du cyclone «Hurricane Andrew» en Floride. Une des conclusions était qu'une assurance trop bon marché induisait des constructions mal protégées dans des zones à risques, et transférait le coût de l'imprudence sur les individus prudents. Est-ce une bonne politique pour la collectivité ?

Miami est une luxueuse station balnéaire. Que se passerait-il en cas de déplacement de la route d'un cyclone de type «Andrew» de quelques kilomètres au Nord, sur Miami ? Réponse sur la figure ci-contre. Les neiges de Saint-Pétersbourg sont prêtes à tomber sur les plages ensoleillées de Miami.



Vitesses des vents lors du passage d'un cyclone de type Andrew sur les côtes de Floride. Le coût des dégâts assurés résultant de la tornade serait de 100 milliards de dollars.



Le froid et le chaud

HERVÉ THIS

Quelques mesures de température en cuisine.

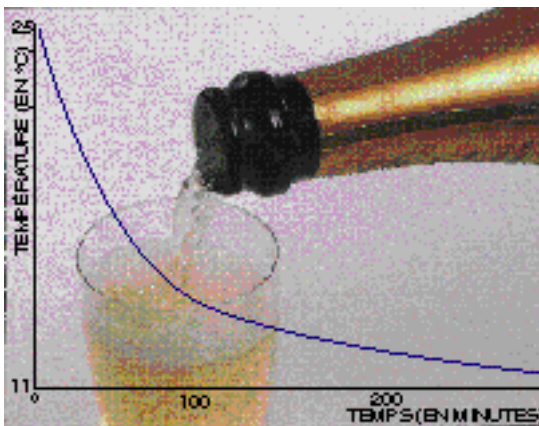
On veut refroidir du champagne : combien de temps la bouteille doit-elle séjourner dans le réfrigérateur ? Les parents gourmandent les enfants qui laissent la porte du réfrigérateur ouverte ; ont-ils raison de craindre un réchauffement rapide des denrées qui y sont conservées ? On monte le vin de la cave pour le chambrer, avant un repas ; combien de temps à l'avance faut-il s'y prendre ? L'emploi d'un thermocouple, appareil qui mesure précisément les températures, donne des ordres de grandeur utiles aux gourmets.

Commençons par ce champagne, que l'on veut frappé. Pour déterminer combien de temps il faut le rafraîchir, on a placé la sonde du thermocouple dans une bouteille qui a été installée dans la porte d'un réfrigérateur à l'équilibre thermique : des bouteilles qui se trouvaient depuis plus de deux jours à côté de l'emplacement où l'on a déposé la bouteille de champagne étaient à une température de 11° C. À partir d'une température initiale du champagne égale à 25° C, les mesures effectuées toutes les dix minutes ont montré un lent refroidissement : après 30 minutes, la température est encore supérieure à 20° C, et c'est seulement après trois heures que l'on obtient une température de 15° C ; la température de 12° C n'a été atteinte qu'après six heures ! Cette mesure confirme, expérimentalement, que le verre conduit mal la chaleur (cette dernière s'y propage par conduction, tandis que, dans l'eau, la chaleur se répartit également par convection).

Voulant boire frais, vous avez tenu compte de cette forte inertie thermique des bouteilles, mais un enfant arrive et ouvre la porte du réfrigérateur. Le champagne que vous peinez à rafraîchir risque-t-il de se réchauffer ? Cette fois, on a mesuré la température dans le réfrigérateur à un endroit où elle était initialement égale à 8° C. À l'extérieur, la température était égale à 20° C.

Quand on ouvre la porte pendant sept secondes seulement, la température de l'air monte à 11° C ; puis elle redescend à 8° C en quelques minutes ; quand on ouvre la porte pendant 20 secondes, la température monte à 18° C, avec

une redescente de la température rapide d'abord, lente ensuite. Le réchauffement de l'air d'un réfrigérateur est donc très rapide, parce que l'air froid et dense du réfrigérateur s'écoule par le bas, remplacé par de l'air ambiant... mais ce réchauffement ne concerne que l'air, et non les bouteilles, dont la capacité calorifique – et l'inertie thermique – est notable : pour ces dernières, la température ne varie quasiment pas lors de l'ouverture momentanée de la porte, et



Pensons à rafraîchir le champagne à l'avance : il faut plusieurs heures avant d'atteindre 12° C, à partir d'une température ambiante de 25° C.

le refroidissement reprend rapidement, après les quelques minutes de refroidissement rapide de l'air.

ET LE CHAUD

Après ces mesures rafraîchissantes, examinons le problème inverse, celui du réchauffement. Une question délaissée est celle du chambrage des vins. En vue d'un bon dîner, on veut monter un vin fin de la cave pour le faire déguster à des amateurs éclairés. Ceux-ci croient savoir que le vin doit être bu à la température de 18° C, mais la cave, elle, n'est qu'à une température de 12° C. Combien de temps à l'avance le vin doit-il être monté pour que la température réglementaire soit atteinte ?

On pourrait naturellement utiliser les lois de la physique pour calculer ce temps, mais faisons une expérience simple : mesurons la température au cours du temps. Dans une pièce à 24° C, où était placée une bouteille de vin à la température initiale de 9° C, on mesure

qu'il faut environ une demi-heure pour atteindre la température de 12° C, trois quarts d'heure pour atteindre la température de 14° C, une heure et quart pour atteindre 16° C, une heure trois quarts pour atteindre 18° C et plus de trois heures pour atteindre 20° C !

La longue durée du chambrage résulte encore de la faible conductivité thermique des bouteilles ; surtout quand la différence de températures entre la pièce et la bouteille est faible, le chambrage est une opération longue, qui ne se décide pas à la dernière minute.

De ces premières mesures, pouvons-nous déduire les temps de chambrage si nous sommes en été, à une température qui atteint 27° C ? Hélas non : il faut d'autres mesures... ou des calculs classiques de théorie de la chaleur. Retenons seulement quelques ordres de grandeur : quand la température de la pièce est égale à 27° C, il faut environ 80 minutes à partir de 12° C ; inversement, quand la température de la pièce est égale à 19° C seulement, il faut cette fois plus de deux heures et demie à partir de 12° C. Lors des mesures, on observe, en outre, que la partie supérieure d'une bouteille (verticale) se réchauffe plus vite que la partie inférieure : la différence peut atteindre quatre degrés, ce qui engendre des différences de goût importantes entre les premières et les dernières gorgées de vin (les arômes s'évaporent plus vite quand la température est élevée).

Enfin, les convives sont à table : versons le vin dans les verres : une fois que le vin, chambré à 16° C, est versé dans le verre, à quelle vitesse se réchauffe-t-il quand la température ambiante est égale à 23° C ? Cette fois, la température dans un verre classique augmente en moyenne de 0,2° C par minute. Voilà de quoi nous inciter à ne verser dans le verre que lorsque les convives sont prêts à boire.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 23 octobre 1997, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

Explosion de poussières

Phénomène meurtrier et difficilement modélisable.

Le 20 août 1997, l'explosion de silos à grains à Blaye, sur l'estuaire de la Gironde, fait 11 morts. Plus de 20 ans après l'explosion de la malterie de Metz, ce dramatique accident repose les problèmes de sécurité liés à la manipulation de produits solides pulvérulents.

La manipulation des grains engendre d'importantes quantités de poussières (0,1 pour cent du poids manipulé) qui, mises en suspension, forment une atmosphère explosive. Lorsque cette atmosphère est mise au contact d'une source d'inflammation, l'explosion se déclenche.

Que s'est-il passé à Blaye ? Les conclusions définitives de l'enquête ne seront pas connues avant plusieurs mois, mais des poussières en suspension ont dû être mises au contact d'une étincelle (provenant d'un frottement mécanique ou de l'électricité statique) ou d'une source résultant d'un « auto-échauffement » (réactions d'oxydo-réduction, fermentation). Les parois des silos de béton n'ont pas résisté à l'explosion.

Peut-on empêcher de tels accidents ou en réduire la gravité ? Les professionnels sont plus conscients qu'auparavant de l'existence de ce risque, ainsi qu'en témoigne la forte participation à un séminaire tenu récemment en France sur les

explosions de poussières. Des mesures réglementaires sont à l'évidence indispensables. Cependant, en raison des enjeux économiques, leur mise en œuvre ne suscite pas toujours une adhésion spontanée. Par ailleurs, la mise en place de dispositifs de protection efficaces se heurte à l'insuffisance des connaissances scientifiques des phénomènes en cause.

Diverses méthodes sont utilisées dans le monde pour classer les poussières en fonction de leur dangerosité (risque d'explosion). Aucune ne fait l'unanimité, car les résultats des tests de classement dépendent d'un grand nombre de facteurs qui varient beaucoup d'un test à l'autre : taille et forme de l'enceinte d'expériences, procédé de mise en suspension, dispositif d'allumage...

Plus la vitesse de combustion d'un mélange est grande, plus l'explosion du mélange est violente. Par exemple, une explosion d'hydrogène est plus violente qu'une explosion de méthane. Ce paramètre caractéristique est beaucoup plus difficile à déterminer dans les mélanges de poussières que dans les gaz : la structure des flammes de poussières et les mécanismes de propagation sont mal connus. Par exemple, les transferts par rayonnement, le plus souvent négligeables dans le cas des gaz, jouent un rôle prépondérant dans certaines flammes de poussières.

L'un des moyens classiques de protection consiste à installer des événements qui cèdent en cas de brusque surpression. Cette technique ne s'applique cependant que dans des conditions précises :

enceintes de forme simple, pas trop allongées, sans variation de section, ni obstacles à l'intérieur. Ces conditions correspondent uniquement aux enceintes de stockage. Dans ces enceintes, la pression résultant de l'inflammation d'une suspension de poussières ne croîtra pas trop vite et les effets de cette croissance pourront être limités par l'action des événements.

Malheureusement, les inflammations accidentelles se produisent rarement dans ce type d'enceintes, mais dans les conduites de transport, les élévateurs, les filtres ou d'autres éléments de manutention. Ces éléments favorisent les vitesses de propagation élevées, de sorte que des ondes de choc peuvent se former. L'utilisation d'événements est alors inopérante et peut même se révéler néfaste en favorisant la propagation de l'explosion entre des enceintes séparées. Hélas, là encore, on connaît mal la propagation de flammes dans des écoulements instationnaires et dans des géométries complexes. Aucune méthode prédictive n'existe aujourd'hui.

Comment caractériser les régimes de combustion, entre déflagration (subsonique) ou détonation (supersonique) ? Cette caractérisation est importante, car la vitesse de propagation d'une détonation est 1 000 fois plus élevée que celle d'une flamme laminaire (la flamme d'un brûleur de réchaud par exemple). Aujourd'hui, peu de résultats sont disponibles, car la taille des expériences « de laboratoire » nécessaire pour obtenir des résultats pertinents est d'au moins 10 fois, voire 100 fois, la taille des montages expérimentaux utilisés dans le cas des mélanges gazeux !

De manière générale, l'étude de la combustion dans des suspensions de poussières est beaucoup plus ardue que celle des mélanges gazeux en raison de l'hétérogénéité du milieu, et parce que la réalisation d'expériences reproductibles dans des conditions bien contrôlées se heurte à d'importantes difficultés techniques. L'effort fait en matière de recherche (tant fondamentale qu'appliquée) par la France en ce domaine reste bien inférieur à celui de la plupart des grands pays industrialisés. Si de tels retards devaient perdurer, la mise au point de dispositifs techniques et de méthodes de protection efficaces serait compromise.

B. VEYSSIÈRE, CNRS, Laboratoire de combustion et de détonique, Poitiers



Près de Bordeaux, une explosion de poussières a détruit une dizaine de silos à grains.