

Ingénierie du risque pour le dimensionnement des ouvrages de protection contre les aléas environnementaux

N. Eckert, P. Favier, L. Bel, E. Parent

Rochebrune, 25 Mars 2026

Motivations

- Les enseignants de statistique (que je connais) ajoutent volontiers au titre de leurs cours de stat *pour l'Aide à la Décision...*

Motivations

- Les enseignants de statistique (que je connais) ajoutent volontiers au titre de leurs cours de stat *pour l'Aide à la Décision...*
- Généralement avec un focus pour l' *Environnement?*

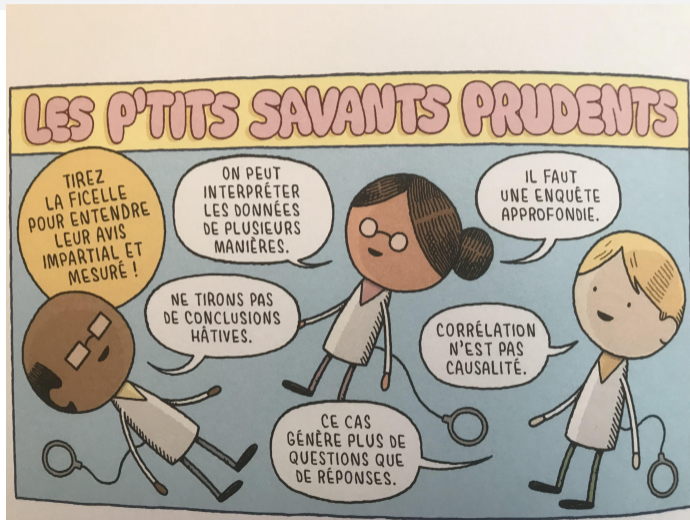
Motivations

- Les enseignants de statistique (que je connais) ajoutent volontiers au titre de leurs cours de stat *pour l'Aide à la Décision...*
- Généralement avec un focus pour l' *Environnement*?
- Est ce qu'on est en droit attendre du statisticien autre chose qu'une vision nuancée et prudente?...du genre météorologique: *Mélange hivernal probable attendu en début d'après-midi?...*

Une attitude critique malgré tout respectablement conservatrice

Données \Rightarrow Modèle \Rightarrow Inférence \Rightarrow
Considérations prédictives \Rightarrow STOP

La vision nuancée et prudente du
statisticien?



La Physique pour les chats (Tom Gauld, 2025)

Statistical Science for the Environment?

- Non stationnarité
- Principe de précaution
- Valeur de l'information
- Effet d'irréversibilité



Emprunté à *Physics for cats* de T. Gauld (2025)

(Exemple de) Processus Naturels: Inondations



Les inondations à Saintes (Charente-Maritime) le 25 février dernier. (AFP/Philippe LOPEZ)

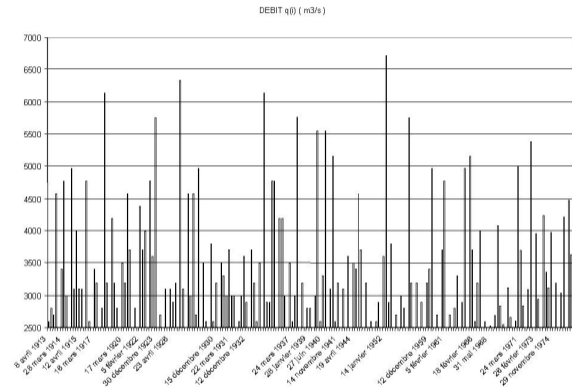
- \approx 300 millions d'euros de dégâts annuels.
- 17 millions de personnes exposées aux inondations.
- \approx 500 décès liés aux inondations sur 30 ans en France, ($> 60\%$) sur l'arc méditerranéen)

(Exemple de) Processus Naturels: Avalanches ...



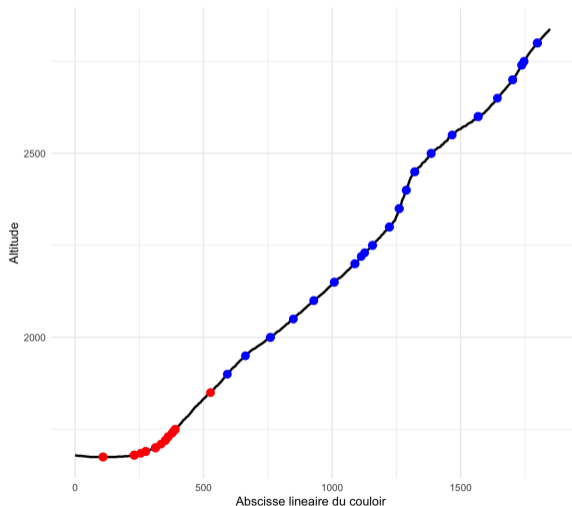
- Les pratiquants de sports de montagne, Constructions et infrastructures routières menacées plus ponctuellement
- Pression foncière forte vs Coûts humains élevés (30 morts/an en France)
- Coûts matériels variables (500 millions d'€ en 98/99 en Europe)

(Données de) Processus Naturels

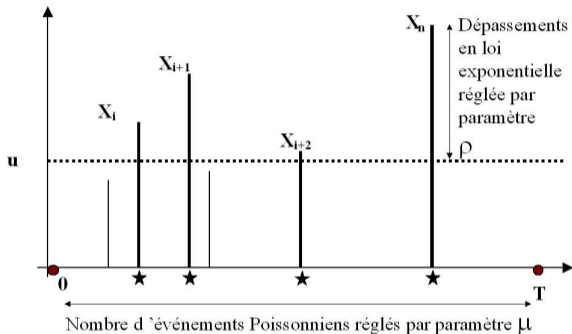


151 Dépassements des pointes de crue au-delà de 2500 m³ / s de la Garonne à Mas d'Agenais durant la période 1913–1977.

Avalanches Bessans Couloir 30 ● arrivées observées ● départs observés



(Modèle de) Processus Ponctuels Marqués $\theta = (\mu, \rho, \beta)$



Dépassements Pareto Généralisé: Données D_t tronquées en u : $X_t = D_t - u$

$$[X_t \leq x | \theta, D_t > u] = 1 - (1 - \beta x)^{\frac{\rho}{\beta}}$$

Exponentiel par continuité en $\beta = 0$:

$$[X_t \leq x | \theta] = 1 - \exp(-\rho x)$$

Le nombre de dépassements $N = \sum_{t=1}^T 1_{D_t > u}$ sur une période T est Poisson

$$[N = k | \mu] = \frac{(\mu T)^k e^{-\mu T}}{\Gamma(k + 1)}$$

Voir Miquel (1984) pour un mode d'emploi à l'usage des ingénieurs EDF du POT Poisson/Exponentiel et Coles (2001) pour une introduction très pédagogique à la modélisation des extrêmes. Détails méthodologiques dans Bernier and Miquel (1979).

Pour les extrem(al)istes

$$[Y \leq y | \theta, y > u] = 1 - (1 - \beta(y - u))^{\frac{p}{\beta}}$$

Si $\beta > 0$, $0 < (y - u) < \beta^{-1}$

$$F_{\mu, \sigma, \xi}(x) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-1/\xi} & \text{for } \xi \neq 0, \\ 1 - \exp\left(-\frac{x - \mu}{\sigma}\right) & \text{for } \xi = 0, \end{cases}$$

Si $\xi < 0$, $\mu < \xi < \mu - \sigma/\xi$

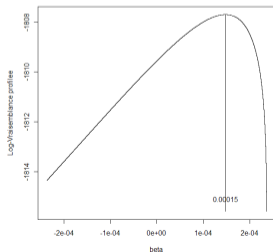
Inférence statistique immédiate (fréquentiste ou bayésienne)

Forme quasi-exponentielle de la vraisemblance

$$\hat{\mu} = \frac{n}{T}$$

$$\hat{\rho} = \frac{-\frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^n \text{Log}(1 - \beta x_i)}{n}$$

$\hat{\beta}$ par vraisemblance profilée



Quasi-conjugaison bayésienne

$$[\rho, \mu, \beta] = b^a \frac{\rho^{a-1}}{\Gamma(a)} e^{-b\rho} \times c^d \frac{\mu^{c-1}}{\Gamma(d)} e^{-d\mu} \times \pi_0(\beta)$$

$$a' = a + n$$

$$b' = b - \frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^n \text{Log}(1 - \beta x_i)$$

$$c' = c + n$$

$$d' = d + T$$

$$[\beta | \mathbf{x}] \propto \pi_0(\beta) \frac{\exp\{-\beta S_n(\mathbf{x}, \beta)\}}{(b + S_n(\mathbf{x}, \beta))^{a+n}}$$

Interprétation 1 : Le “risque” acceptable via un quantile associé à une période de retour bien choisie

Probabilité de l'événement (dommageable) Période de retour, une interprétation délicate voire fallacieuse:

$$T_G(h) = \frac{1}{1 - G(h)}$$

Pour un modèle Pareto Généralisé:

$$T_G(h) = (1 - \beta h)^{-\frac{\rho}{\beta}}$$

Si exponentiel

$$T_G(h) = \exp(\rho \times h)$$

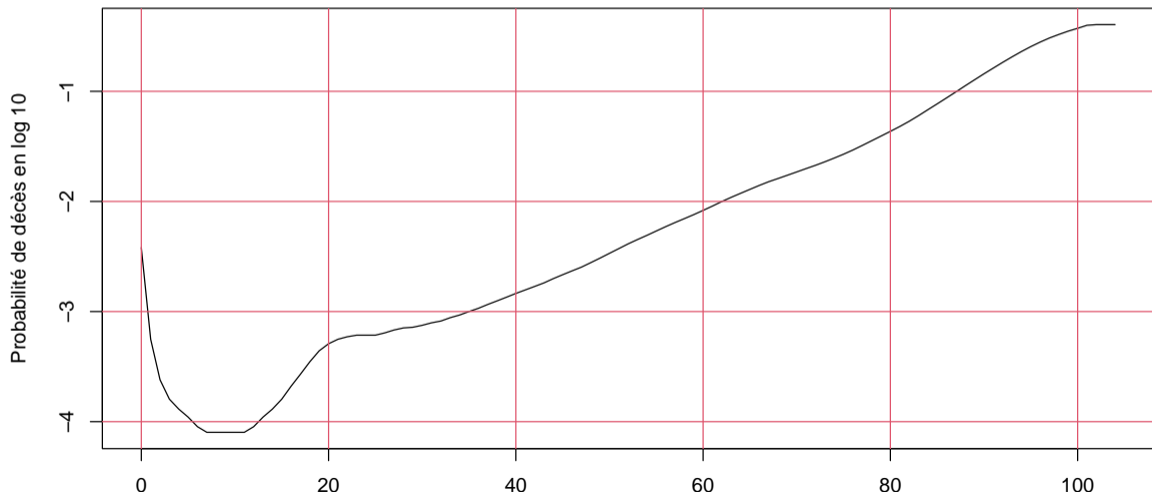
Et pour le Peak Over Thershold

$$T_{POT}(h) \approx \frac{T_G(h)}{\mu}$$

$$\frac{\text{Log}(1000) - \text{Log}(100)}{\text{Log}(100) - \text{Log}(10)} = 1 = \frac{q_{1000} - q_{100}}{q_{100} - q_{10}}$$

Quel "risque" acceptable? pour un individu...

Courbe de mortalité chez les hommes sur l'ensemble des CSP



Quel “risque” acceptable? Pour une collectivité. . .

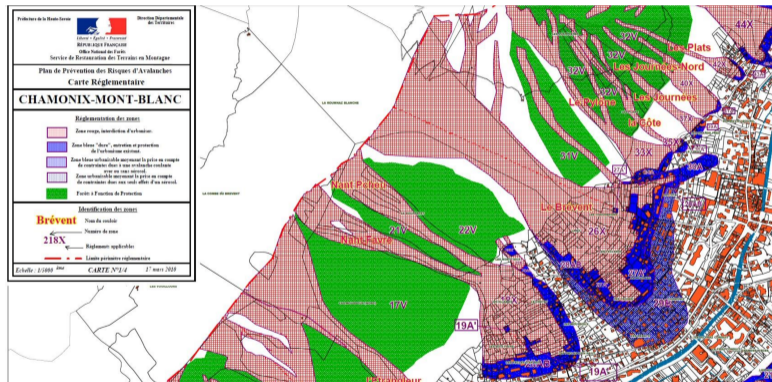
Minimum return periods for dams	
Type of Dam	Return period (years)
Major dam with loss of life	10000
Earth Dams	1000
Masonry or concrete dams	500
Costly dams with no likelihood of loss of life	500
Moderately costly dams	100
Minor dams	20

Le barème de Schnakenberg (1949) a été utilisé par la commission des grands barrages puis abandonné au profit de l'étude économique complète pour les évacuateurs de crues de Serre-Ponçon (cf Labaye (1956)).

Dommmages de Processus Naturels



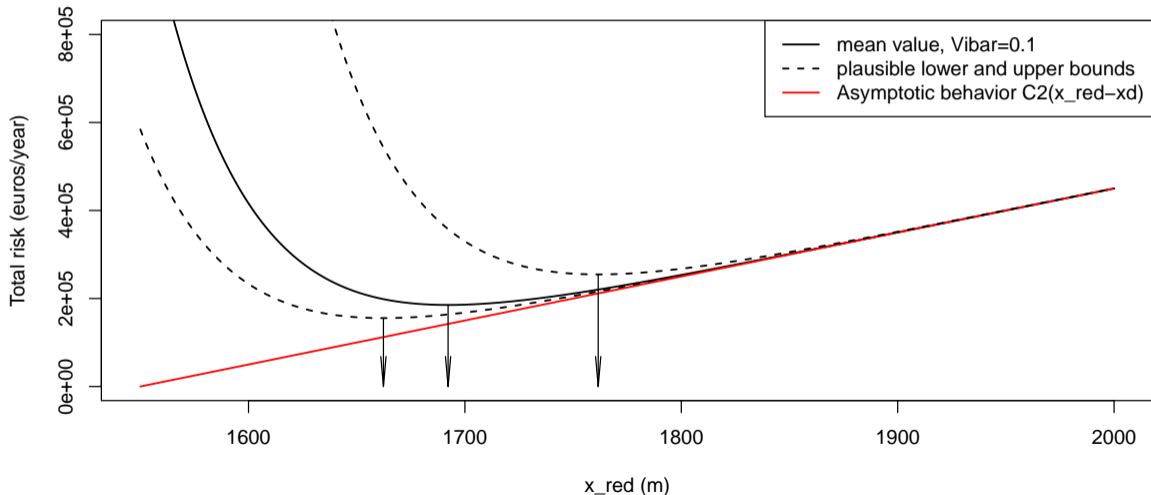
Pratique administrative du plan de prévention des risques: le zonage



Zonage réglementaire extrait du Plan de Prévention des Risques, volet Avalanches (PPRA), commune de Chamonix, France. Risque fort (zone rouge), risque modéré (zone bleue) et forêts à rôle protecteur (surfaces vertes).

- Zone rouge : pas de bâtiments. Vies épargnées vs restrictions à l'urbanisation;
- Zone bleue : bâtiments renforcés. Pertes humaines vs restrictions;
- Zone blanche: pas de restrictions versus "risque" de base;

Interprétation 2 : Le risque = un coût attendu de dommages



Au sens statistique, un risque est le coût attendu d'une stratégie $\delta : x \mapsto h$

- Bilan:

$$W(h, x) = C(h) + D(h, x)$$

- Coût/Gain :

$$U(h, \theta) = \int W(h, x)[x|\theta]d\theta$$

- Règle de décision

$$\delta : x \mapsto h$$

- Risque :

$$R(\delta, \theta) = \mathbb{E}(U(\delta(X), \theta))$$

- Risque bayésien :

$$\bar{R}_{\pi_0}(\delta) = \int R(\delta, \theta)\pi_0(\theta)d\theta$$

Exemple du dépassement Poisson-Exp

$$W(h, x) = C \times h + \mu D \times \int_h^\infty e^{-\rho y} (y - h) dy$$

$$U(h, \theta) = C \times h + \mu D \frac{e^{-\rho h}}{\rho}; \quad h^* = \frac{\text{Log}(\mu \frac{D}{C})}{\rho}; \quad T_G(h^*) = \mu \frac{D}{C}$$

- Règle (emirique): se prémunir de $k = 3$ fois le max des valeurs de débordement observées de par le passé $\delta(x_{1:n}) = h = k \times \max_i(x_i)$
- Règle (plus microéconomico-statistique): faire confiance au statisticien $\delta(x_{1:n}) = \frac{\text{Log}(\hat{\mu}(x) \frac{D}{C})}{\hat{\rho}(x)}$
- Règle bayésienne : ArgMin de $\bar{R}_{\pi_0}(\delta)$

Règles non dominées et classe complète

- fonction de coût:

$$U(h, \theta) = C \times h + \mu D \frac{e^{-\rho h}}{\rho};$$

- Risque en situation d'incertitude :

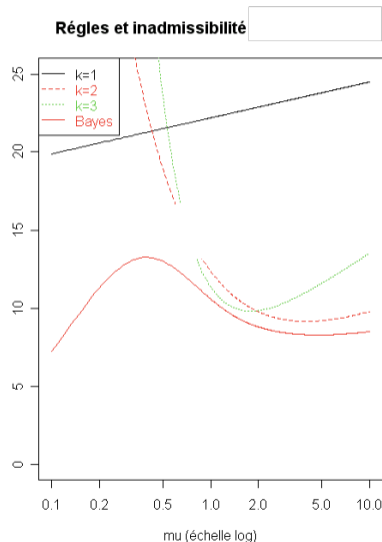
$$R(\delta, \theta) = \mathbb{E}(U(\delta(X), \theta))$$

- Règle du max:

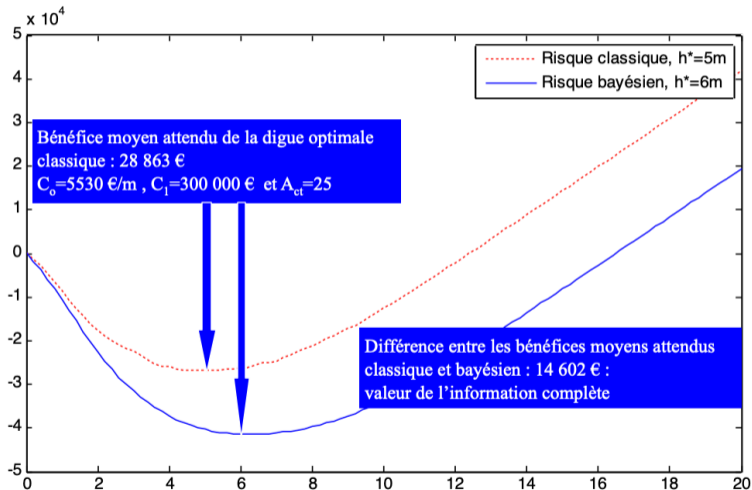
$$\delta_k(x_{1:n}) = k \times \max_i(x_i)$$

- Règle de Bayes avec prior π :

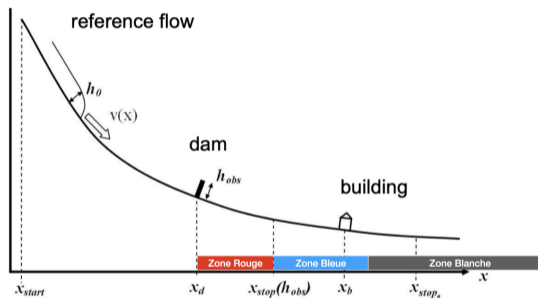
$$\delta_\pi = \underset{b}{\text{ArgMin}}(\bar{R}_\pi(\delta))$$



Analyse de sensibilité "pondérée" R vs \bar{R} : le choix bayésien



Modèle plus réaliste: ouvrage paravalanche + zonage



Dissipation locale de l'énergie :

$$\frac{v^2(h_d)}{v^2(h_0)} = 1 - \frac{\alpha}{2} \times \frac{h_d}{h_0}$$

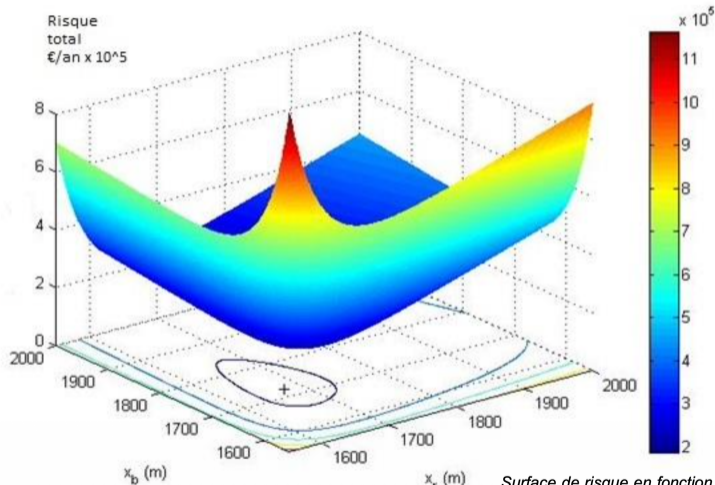
α est estimé sur des expériences d'écoulement à petite échelle

Tout se passe dans les équations comme si la distance moyenne parcourue ρ^{-1} était réduite par l'amortissement d'une digue paravalanche en

$$\rho'^{-1} = \rho^{-1} \times \left(1 - \alpha \times \frac{h_d}{h_0}\right)$$

$$R(x_r, x_b, h, \theta) = C \times h + C_r \times (x_r - x_d) + C_b \times (x_b - x_r) + \int_{x_r}^{-\infty} D(y) \times [y|\rho(h), \alpha, \mu] dy$$

Optimisation tri-variée + Etudes de sensibilité



Solutions analytiques : période et niveaux de retour équivalents!

$$\begin{cases} x_r^* = x_d + \frac{1}{\rho} \ln \left(\frac{\lambda C_1 \bar{V}_i'}{\delta x (C_2 - C_2')} \right) = x_d + \frac{1}{\rho} \ln(\lambda T_r^*) \\ x_b^* = x_d + \frac{1}{\rho} \ln \left(\frac{\lambda C_1 (\bar{V}_i - \bar{V}_i')}{\delta x C_2'} \right) = x_d + \frac{1}{\rho} \ln(\lambda T_b^*) \end{cases}$$

Surface de risque en fonction des limites de zones rouge et bleue. Modèle d'aléa calibré par maximum de vraisemblance sur le couloir EPA numéro 30 de la commune de Bessans, France. Fonction de coût f de type linéaire.

Les modèles mathématiques font tenir au statisticien un rôle essentiel

- Utilisation des modèles de processus ponctuels marqués.
- Coûts importants de protection et de dommages potentiels justifient une attention particulière à la quantification des conséquences socio-economiques.
- Attention au transfert de la responsabilité du décideur vers l'analyste.
- Estimer au *mieux*? Une approximation quadratique de la fonction de coût ne rend pas compte des enjeux *dissymétriques* de sur- ou de sous-estimation.
- Prise en compte de l'incertitude et Valeur de l'information : Le Risque bayésien , une approche plus prudente?
- Quantité d'intérêt? Loss function? Redéfinir le concept de risque, une jacasserie inutile en matière de théorie de la décision* statistique

* Lire Wald (1950) et ses successeurs

Conclusions

- Discuter avec les modélisateurs de la micro-économie du risque, une bonne idée?
- la percée des outils de l'optimisation dans le champ de la i-statistique, avancée technique, espoir d'une meilleure prise en compte de l'incertitude?
- *Les mathématiciens des finances, forts de leurs immenses succès, pourront enseigner aux sciences de l'environnement comment utiliser adroitement les techniques nouvelles pour faire sombrer notre belle planète.* Jean-Jacques DAUDIN, Professeur de statistique à AgroParisTech

L'essentiel des points techniques figurent dans Eckert and et.al (2018) et Favier et al. (2016), les considérations plus philosophiques n'engagent que moi.

Références

- Bernier, Jacques, and Jacques Miquel. 1979. "Incertitudes de l'information Et décisions En Situation de Risque. Cas de Problèmes de Protection Contre Les Crues." *La Houille Blanche*, no. 4-5: 251–58.
- Coles, Stuart. 2001. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Vol. 208. Springer.
- Eckert, Nicolas, and et.al. 2018. "Repenser Les Fondements Du Zonage règlementaire Des Risques En Montagne «récurrents»." *La Houille Blanche*, no. 2: 38–67.
- Favier, Philomene, Nicolas Eckert, Thierry Faug, David Bertrand, and Mohamed Naaim. 2016. "Avalanche Risk Evaluation and Protective Dam Optimal Design Using Extreme Value Statistics." *Journal of Glaciology* 62 (234): 725–49.
- Gauld, Tom. 2025. *Physics for Cats*. Edinburgh: Canongate Books.
- Labaye, G. 1956. "Le Problème Des Évacuateurs de Crues de Serre Ponçon : Essai de détermination d'un Optimum Économique." *Revue de Statistique Appliquée* 4 (3): 46–57.
- Miquel, Jacques. 1984. *Guide Pratique d'estimation Des Probabilités de Crues*. Paris: Eyrolles.
- Schnakenberg. 1949. *Extreme Flood Discharges*. New Zealand institution of engineers

Lequel de ces modèles ressemble le plus à un Spitzfire?



Sten Bergström, SMHI

Vazken Andreassian: Lequel de ces modèles vole?



Sten Bergström, SMHI