

## Prévisions ponctuelles et régionales des crues fluviales et des crues soudaines avec le modèle de bilan hydrologique LARSIM

### Local and regional forecasts of river floods and flash floods using the LARSIM water balance model

PALI Jules<sup>1</sup>, HAAG Ingo<sup>2</sup>, GERLINGER Kai<sup>2</sup>, DEMUTH Norbert<sup>3</sup>

<sup>1</sup>DREAL Grand-Est/SPRNH (Service de Prévision des crues Rhin-Sarre), 14 rue du Bataillon de Marche n° 24, FR-67200 Strasbourg, France, e-mail : jules.pali@developpement-durable.gouv.fr

<sup>2</sup>HYDRON GmbH, Ritterstr. 9, DE-76137 Karlsruhe, Allemagne, e-mail : ingo.haag@hydron-gmbh.de, kai.gerlinger@hydron-gmbh.de

<sup>3</sup>Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, Kaiser-Friedrich-Straße 7, DE-55116 Mainz, Allemagne, e-mail : norbert.demuth@lfu.rlp.de

#### Résumé

Dans le contexte du changement climatique, les centres de prévision des crues ont besoin de nouvelles approches afin de mieux prévoir les crues, notamment lors d'événements de pluies intenses. Depuis de nombreuses années, LARSIM est utilisé avec succès en mode opérationnel dans plusieurs centres de prévision, notamment dans les bassins versants du Rhin et du Danube, pour la prévision des crues fluviales (crues dans des cours d'eau résultant de précipitations étendues, abondantes et persistantes) aux stations hydrométriques (« prévisions ponctuelles »).

L'extension à la prévision des crues soudaines (crues qui se produisent en très peu de temps suite à de fortes précipitations, même loin des cours d'eau) permet d'élargir l'application du modèle LARSIM. Pour ce faire, l'approche du modèle RoGeR a été reprise dans LARSIM. Outre l'incertitude hydrologique, il faut également tenir compte de l'incertitude météorologique, raison pour laquelle l'utilisation de données météorologiques d'ensemble est mise en œuvre dans LARSIM. Afin d'obtenir des prévisions pour de petits bassins versants sans possibilité de calage, il est judicieux de recourir à des approches d'alerte précoce spécifiques aux régions (« prévisions régionales »), qui sont également rendues possibles à l'aide des données de simulation de LARSIM.

L'article présente le modèle LARSIM et son fonctionnement, les différents processus d'écoulement en particulier pour la prévision des crues soudaines, l'utilisation de prévisions d'ensemble et les perspectives d'utilisation du modèle dans le cadre de prévisions à l'échelle de petits bassins versants.

**Mots-clefs :** LARSIM, RoGeR, prévision des crues, infiltration, prévisions d'ensemble

#### Abstract

In the context of climate change, flood forecasting centres need new approaches to better predict flood events, especially during intense rainfall events. For many years, LARSIM has been successfully used in operational mode in several forecasting centres, notably in the Rhine and Danube catchment areas, for forecasting of river floods (floods in rivers that are the result of large-scale, extensive and persistent rainfall) at water gauges (“local forecasts”). The extension to the forecasting of flash floods (floods that occur in a very short time due to heavy rainfall, even away from rivers) broadens the model's application. For this purpose, the approach of the RoGeR model was implemented in LARSIM.

In addition to hydrological uncertainty, meteorological uncertainty must also be taken into account, which is why the use of ensemble meteorological data is implemented in LARSIM. In order to obtain forecasts for small catchments without the possibility of calibration, it makes sense to use region-specific early warning approaches (“regional forecasts”), which are also already implemented with simulation data of LARSIM.

The article presents the LARSIM model and how it works, the various flow processes with particular reference to flash flood forecasting, the use of ensemble forecasts and the prospects for using the model in forecasts for small catchment areas.

**Keywords:** LARSIM, RoGeR, flood forecasting, infiltration, ensemble forecasts

## 1. Présentation du modèle LARSIM

Le modèle de bilan hydrologique (MBH) LARSIM sert entre autres d'outil d'analyse et de prévision des crues. La DREAL Grand-Est ainsi que les services de prévision des crues (SPC) de plusieurs Länder allemands, au Luxembourg, en Suisse et en Autriche utilisent LARSIM depuis de nombreuses années pour la prévision opérationnelle des crues et pour l'alerte des crues (Bremicker, 2000; Bremicker et al., 2013; Gerlinger & Demuth 2001; Haag et al., 2019). Le modèle est continuellement développé pour le compte de la communauté des développeurs LARSIM (CDL) en vue de cette utilisation. La CDL se compose de quatre SPC du sud de l'Allemagne et par l'Office fédéral de l'environnement suisse. En France, la coopération internationale sur la Moselle et la Sarre signée en 1987 entre l'Allemagne, le Luxembourg et la France permet notamment un suivi régulier des besoins en développement du modèle. Des ateliers internationaux LARSIM rassemblent régulièrement des experts, chercheurs et utilisateurs à des fins d'évolution et de retours d'expérience (fonctionnement opérationnelle, simulations de la température de l'eau et d'étiages, prévision de remplissage de barrages, « machine learning », etc.). Des informations sur LARSIM (par ex. présentations de l'atelier, documentation sur le modèle, aide en ligne, documents de formation) sont disponibles à l'adresse suivante : [www.larsim.info](http://www.larsim.info).

LARSIM est un modèle basé sur la représentation des processus d'écoulements répartis dans l'espace. Lors de la construction d'un modèle, les données de terrain sont recoupées (fig. 1) et divisées en entités spatiales (ES). Les ES sont reliées entre elles par le réseau de drainage du modèle. Les ES peuvent représenter des sous-bassins hydrologiques réels ou des rasters (fig. 2). Dans les modèles opérationnels LARSIM à haute résolution spatiale, ces ES ont souvent une taille d'environ 1 km<sup>2</sup> (Bremicker et al., 2013). Au SPC Rhin-Sarre, le MBH de la Sarre est constitué de rasters d'une résolution de 1 km<sup>2</sup>, tandis que le MBH de l'Alsace est constitué de sous-bassins hydrologiques avec une superficie moyenne d'environ 2,2 km<sup>2</sup>.

Le calcul de la concentration du débit et de la propagation des ondes de crue dans les tronçons de rivières s'effectuent au niveau de l'ES. La concentration de l'écoulement est alors généralement représentée par quatre réservoirs linéaires individuels en parallèle réagissant à des vitesses différentes et représentant les composantes de l'écoulement que sont le débit de base, l'interflow, l'écoulement direct lent et l'écoulement direct rapide (fig. 3 et Haag et al., 2022). La concentration de l'écoulement est alors contrôlée par des constantes de rétention déterminées par calibration. La constante de rétention pour la concentration du débit de l'écoulement direct rapide, important en cas de fortes pluies, est calibrée à l'aide du paramètre EQD2 (fig. 2; Haag et al., 2021; LEG, 2022).

Chaque ES est subdivisée en sous-entités spatiales (SES) aux réactions hydrologiques similaires, également appelées hydrotopes ou Hydrological Response Units (HRU). Ces SES, qui s'étendent généralement sur quelques hectares, sont définies par une occupation uniforme des sols et des caractéristiques de sol comparables (fig. 2). La dynamique de la neige, l'interception, l'évapotranspiration (en général selon Penman-Monteith) ainsi que le régime hydrique du sol et la formation de l'écoulement sont simulés à l'échelle des SES (fig. 3). La simulation de l'évapotranspiration, du régime hydrique du sol et de la formation de l'écoulement se basent sur le réservoir-sol spécifique aux SES, qui représente le volume effectif des pores [mm].

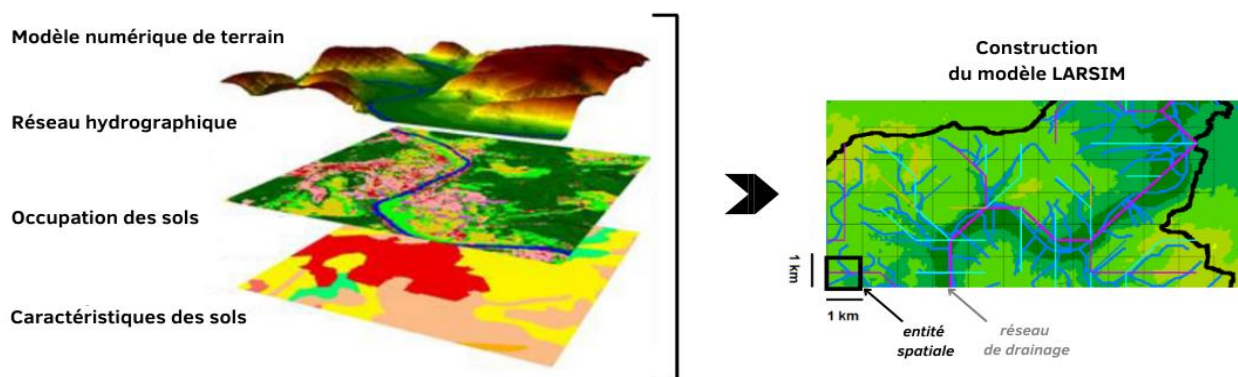


Figure 1. Données de terrain utilisées pour la construction du modèle LARSIM

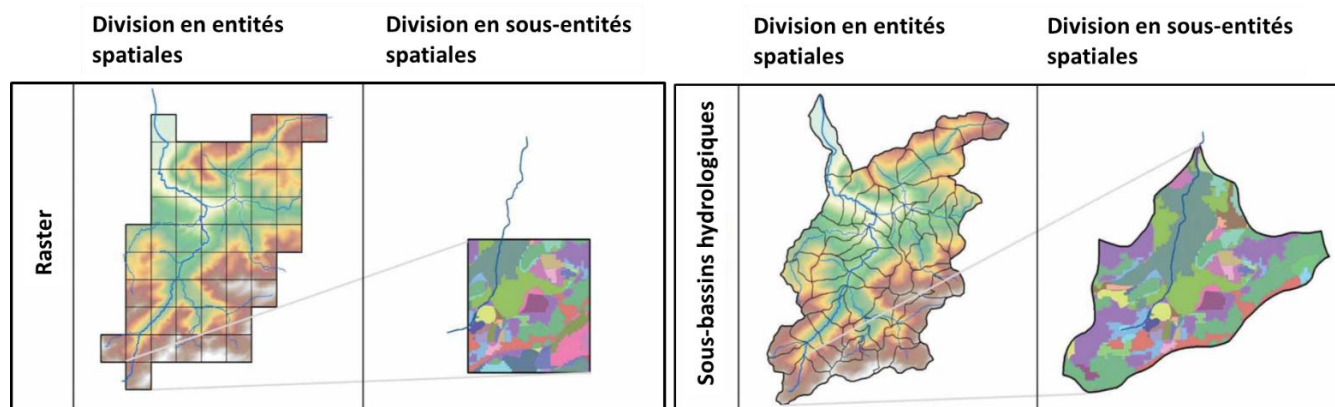


Figure 2. Structure spatiale d'un modèle LARSIM avec répartition des entités spatiales en raster (à gauche) et en sous-bassins hydrologiques (à droite). Chaque entité spatiale est divisée en sous-entités spatiales pour le calcul de la formation des écoulements. Les sous-entités spatiales sont représentées dans la figure par les différentes couleurs (Haag et al. 2022).

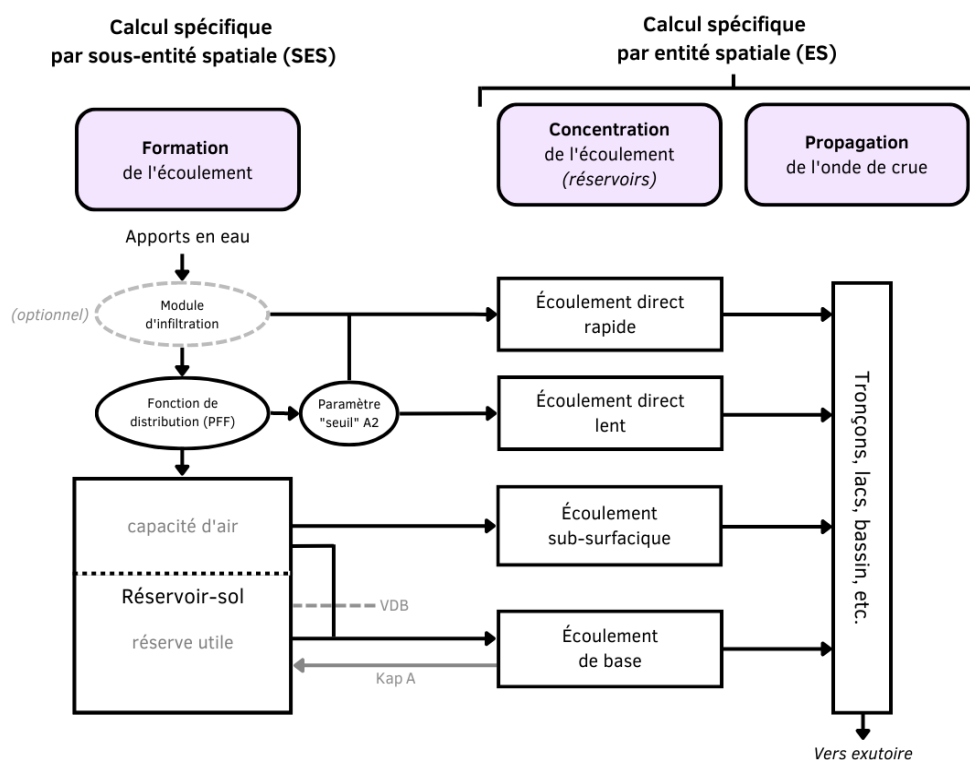


Figure 3. Représentation schématique de la formation des écoulements dans LARSIM (Haag et al. 2022)

Le volume effectif des pores est à son tour subdivisé en capacité d'air (CA) et en réserve utile (RU). La CA est rapidement vidée par infiltration verticale en profondeur vers l'écoulement de base et/ou par drainage latéral vers l'interflow. La RU n'est pas vidée ou ne l'est que très lentement par infiltration verticale en profondeur vers l'écoulement de base et reste donc disponible à long terme pour l'évapotranspiration. Avec un coefficient de perméabilité verticale spécifique aux SES en option (coefficient de perméabilité VDB), il est possible de tenir compte du fait que l'infiltration en profondeur est réduite en présence d'horizons de sol hydrauliquement peu perméables. Pour les SES proches de la nappe phréatique, la remontée capillaire (kapA) dans le réservoir de sol peut être également représentée en option (fig. 3 et LEG, 2022).

Afin de proposer les meilleurs résultats possibles, LARSIM requiert une 10e de paramètres à caler manuellement, dont la méthode est décrite dans Haag et al. (2021). Le domaine surveillé par le SPC Rhin-Sarre fait actuellement l'objet d'un recalage avec les données retravaillées de l'ensemble des stations d'observations hydrologiques et météorologiques depuis 1998, mais aussi avec de nouvelles données pédologiques.

## 2. Modélisation de l'écoulement direct

### 2.1 Modélisation de l'écoulement direct par saturation

Dans les modèles opérationnels LARSIM, la réaction rapide à l'écoulement (écoulement direct  $QS_D$ ) est généralement représentée par la méthode de Xinanjiang (Zhao, 1977) modifiée d'après Todini (1996), dans laquelle la part de l'écoulement direct par rapport à la quantité d'eau disponible est une fonction non linéaire du remplissage actuel de la réserve de sol (Beven, 2012). Dans LARSIM, le procédé pour calculer  $QS_D$  est appelé fonction de surface de saturation en humidité du sol ou Preferential Flow Function (PFF) :

$$QS_D = P - (W_m - W_0) \text{ pour } \left( \left( 1 - \frac{W_0}{W_m} \right)^{\left( \frac{1}{b+1} \right)} - \frac{P}{(1+b)W_m} \right) \leq 0 \text{ et } P + W_0 > W_m \quad (1)$$

ou :

$$QS_D = P - (W_m - W_0) + W_m \left( \left( 1 - \frac{W_0}{W_m} \right)^{\left( \frac{1}{b+1} \right)} - \frac{P}{(1+b)W_m} \right)^{(b+1)} \text{ pour } \left( \left( 1 - \frac{W_0}{W_m} \right)^{\left( \frac{1}{b+1} \right)} - \frac{P}{(1+b)W_m} \right) > 0 \quad (2)$$

avec :

$P$  (mm) : apports en eau (précipitations ou fonte des neiges) pendant le pas de temps de calcul

$W_0$  (mm) : remplissage du réservoir du sol au début du pas de temps de calcul

$W_m$  (mm) : quantité maximale d'eau contenue dans le réservoir total du sol (définie par la somme de CA + RU)

$b$  (adim°) : paramètre de forme de la relation entre l'humidité du sol et les surfaces de saturation

L'écoulement direct déterminé par la PFF est ensuite divisé en écoulement direct « lent » et en écoulement direct « rapide » au moyen du paramètre A2 (valeur seuil sous la forme d'un taux [mm/h], Haag et al. 2021). Tant que le taux de l'écoulement direct total formé par la PFF est inférieur à A2, l'écoulement direct total est évacué sous forme d'écoulement direct lent. Si le taux actuel de l'écoulement direct total dépasse la valeur seuil A2, la partie qui dépasse A2 est évacuée sous forme d'écoulement direct rapide (fig. 3, LEG 2022).

L'écoulement direct est donc déterminé jusqu'à présent dans LARSIM à l'aide d'une approche conceptuelle qui dépend principalement de l'humidité du sol. La quantification du ruissellement direct rapide s'effectue surtout par une approche de valeur seuil très simple, dans laquelle le paramètre A2 doit être déterminé par calibration.

### 2.2 Modélisation de l'écoulement direct par dépassement de la capacité d'infiltration

Dans le passé, LARSIM a surtout été utilisé et développé pour simuler des crues fluviales. Ces crues sont généralement provoquées par des précipitations prolongées et de grande ampleur, qui entraînent une saturation des sols dans les bassins versants. Les processus à l'origine de ces crues fluviales sont donc pris en compte de manière suffisamment détaillée dans le MBH (LEG, 2022). Après les inondations dévastatrices consécutives aux fortes pluies de ces dernières années, LARSIM a été perfectionné afin de représenter au mieux les inondations (locales) qui résultent en premier lieu d'un excédent d'infiltration ou d'un écoulement de surface de Horton (HOF) (Haag et al., 2022). Le module d'infiltration basé sur la physique du modèle de précipitations-débits RoGeR (Runoff Generation Research), développé à la chaire d'hydrologie de l'université de Fribourg, a été identifié comme une approche très appropriée à cet effet (Steinbrich et al., 2016).

Dans LARSIM, le module d'infiltration de RoGeR est placé en amont du module de sol proprement dit. La part de l'apport en eau qui dépasse la capacité d'infiltration actuelle simulée dynamiquement est indiquée comme excédent d'infiltration et évacuée par l'écoulement direct rapide. Seule la partie infiltrée arrive dans le module de sol et y est traitée de la même manière que sans module d'infiltration. Pour le calcul de l'infiltration totale, les trois processus partiels de l'infiltration par la matrice du sol, de l'infiltration par les macropores et, le cas échéant, de l'infiltration par les fentes de retrait sont pris en compte (fig. 4) (Haag et al. 2022).

Dans LARSIM, l'effet de réduction de l'infiltration à cause de la croûte de battance et de l'envasement sur les surfaces cultivées est également pris en compte de manière simplifiée.

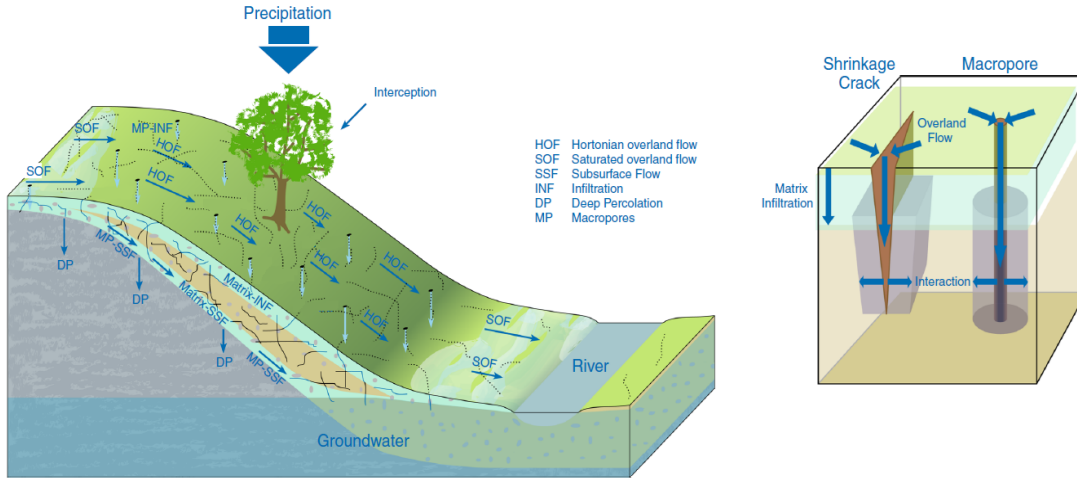


Figure 4. Processus d'écoulements implémenté dans le modèle RoGeR (Steinbrich et al. 2016)

#### Infiltration par la matrice du sol :

L'infiltration suit les approximations physiques des processus d'infiltration réels (équations selon l'approche de Green & Ampt 1911 et selon Peschke 1985), en tenant compte de l'intensité des précipitations, des forces de succion au niveau du front de saturation ( $wsf$ ), de la conductivité hydraulique à saturation du sol ( $ks$ ) et du volume poreux efficace ( $P_{eff}$ ) (LEG, 2022) :

$$F_{pot}(t) = \frac{ks(t-ts)}{2} + \sqrt{\frac{(ks(t-ts))^2}{4} + (ks(t-ts)) + (2 \cdot wsf \cdot P_{eff} + F_s) + F_s^2} \quad (3)$$

avec :

$F_{pot}(t)$ (mm) : infiltration potentielle cumulée de la matrice à l'instant  $t$

$t$ (h) : heure du début de l'événement

$ts$ (h) : moment de saturation de la surface (« time to ponding »)

$F_s$ (mm) : quantité d'eau infiltrée dans la matrice du sol jusqu'au moment  $ts$

L'infiltration réelle par la matrice du sol au pas de temps actuel  $f_{matrice}(t)$  est éventuellement limitée par la quantité d'eau disponible.

#### Infiltration par les macropores :

La part restante des apports en eau est ensuite disponible pour l'infiltration potentielle, suivant la distance entre le front de saturation et les macropores, faisant ainsi diminuer la capacité d'infiltration des macropores au cours du temps (processus analogue pour les fentes de retrait, LEG 2022) :

$$MP_{infpot}(t) = \pi \cdot MP_{longueur} \cdot P_{eff} \cdot MP_{densité} \cdot \frac{MP_{SFT}(t)^2 - MP_{SFT}(t-1)^2}{10^6} \quad (4)$$



avec :

$MP_{infpot}$ (mm) : infiltration potentielle via les macropores

$MP_{longueur}$ (mm) : longueur efficace en termes d'infiltration des macropores

$MP_{densité}$ : nombre de macropores par m<sup>2</sup>

$MP_{SFT}$ (mm) : distance entre le front de saturation et le bord des pores à l'instant t

L'infiltration réelle par les macropores au pas de temps actuel  $f_{macropores}(t)$  est éventuellement limitée par la quantité d'eau disponible dans les macropores.

#### *Infiltration par les fentes de retrait :*

En fonction de la teneur en argile et de l'humidité actuelle du sol, celui-ci peut également présenter des fentes de retrait. L'infiltration se poursuit alors via les fentes de retrait afin de calculer l'augmentation de la surface saturée autour des fentes de retrait. En fonction de l'eau infiltrée, la nouvelle distance entre le front de saturation et le bord des fentes de retrait est ainsi calculée (LEG, 2022) :

$$TR_{infpot}(t) = TR_{prof} \cdot P_{eff} \cdot TR_{longueur} \cdot 2 \frac{TR_{SFT}(t) - TR_{SFT}(t-1)}{10^6} \quad (5)$$

avec :

$TR_{infpot}$ (mm) : infiltration potentielle via les fentes de retrait à l'instant t

$TR_{prof}$ (mm) : profondeur efficace en termes d'infiltration des fentes de retrait

$TR_{longueurqm}$ (mm/m<sup>2</sup>) : longueur des fentes de retrait par mètre carré

$TR_{SFT}$ (mm) : distance entre le front de saturation et le bord des fentes de retrait à l'instant t

L'infiltration effective par les fentes de retrait au pas de temps actuel  $f_{fentes}(t)$  est éventuellement limitée par la quantité d'eau disponible dans les fentes de retrait.

#### *Infiltration totale*

L'infiltration totale  $f_{total}$  résulte de la somme des trois processus partiels :

$$f_{total}(t) = f_{matrice}(t) + f_{macropore}(t) + f_{fentes}(t) \quad (6)$$

Par conséquent, l'écoulement direct basé sur l'excédent d'infiltration résulte de la différence entre l'apport en eau et l'infiltration totale. L'infiltration totale est dirigée vers le réservoir de sol suivant et influence ainsi son remplissage et son comportement.

#### *Application de la modélisation de l'écoulement direct par dépassement de la capacité d'infiltration*

L'approche choisie permet d'optimiser la modélisation du processus d'infiltration lors d'événements de pluie intenses ou de sols très secs dans LARSIM. Afin d'éviter des calculs d'infiltration plus complexes en continu, le module d'infiltration par dépassement de la capacité d'infiltration s'active dans LARSIM seulement lorsqu'une valeur seuil définie d'intensité des apports en eau est dépassée et se désactive lorsqu'une valeur seuil définie d'intensité d'apport en eau est durablement dépassée. Lorsqu'un nouvel événement intense a lieu, les conditions initiales du module (constantes durant l'événement) sont déduites du remplissage du réservoir-sol à l'instant considéré (porosité réelle et profondeur des fentes de retrait).

La condition préalable à l'application est la disponibilité de paramètres du sol supplémentaires (conductivité hydraulique, force de succion, description des macropores et des fentes de retrait, etc.). La plupart d'entre elles peuvent être déduites des données pédologiques et d'occupation des sols (Haag et al., 2022). Les modèles actuellement recalés pour le domaine surveillé par le SPC Rhin-Sarre contiennent les paramètres de sol nécessaires, de sorte que l'approche RoGeR peut en principe être utilisée de manière opérationnelle dans LARSIM pour le calcul des crues soudaines.

D'après Steinbrich et al (2016), le modèle RoGeR a été notamment validé en montrant sa capacité à reproduire la dynamique temporelle, le débit de pointe ainsi que les volumes de ruissellement sur plus d'une trentaine d'épisodes de crue observés dans une dizaine de bassins versants. Haag et al. 2022 montrent l'amélioration des simulations avec les approches de RoGeR dans LARSIM pour la simulation de fortes précipitations pour cinq bassins versants et sept événements en Allemagne. Ils soulignent que la simulation de la réaction d'écoulement de petits bassins versants à des événements de fortes pluies localisées dépend fortement d'une saisie spatiale et temporelle précise de l'intensité réelle des précipitations. En outre, le pas de temps des données météorologiques et le pas de temps de calcul devraient être réduits à des pas de temps de 15 minutes au lieu du pas de temps d'une heure normalement utilisé en opérationnel. Dans l'ensemble, les mesures et les prévisions des précipitations basées sur le radar doivent encore être améliorées. En raison des incertitudes liées à l'intensité et à l'affectation spatiale des précipitations prévues, les prévisions de crues locales dues à de fortes pluies devraient donc être généralisées et transformées en une information régionale (voir chapitre 4).

### 3. Utilisation des prévisions d'ensemble dans LARSIM

En raison des incertitudes dans les prévisions météorologiques, il est nécessaire d'estimer et d'interpréter ces incertitudes et leur influence sur les prévisions hydrologiques. Pour ce faire, les services météorologiques fournissent des prévisions d'ensemble dans lesquelles des changements dans les conditions initiales et dans les paramétrages conduisent à des prévisions météorologiques différentes, mais tout aussi probables. Les prévisions de débit basées sur des ensembles sont également de plus en plus utilisées pour la prévision opérationnelle (Wu et al., 2020).

Pour chaque calcul de prévision, le SPC Rhin-Sarre utilise actuellement l'ensemble ICON-D2-EPS du service météorologique allemand (DWD) composé de 20 membres ainsi que les prévisions déterministes du DWD (ICON-D2, ICON-EU et ICON-GL). Les résultats des simulations sont évalués automatiquement pour chaque station et sont représentés graphiquement (fig. 5). Pour une meilleure interprétation, le faisceau de prévisions disponible peut également être représenté à l'aide de la médiane et des quantiles 10 % et 90 % associés.

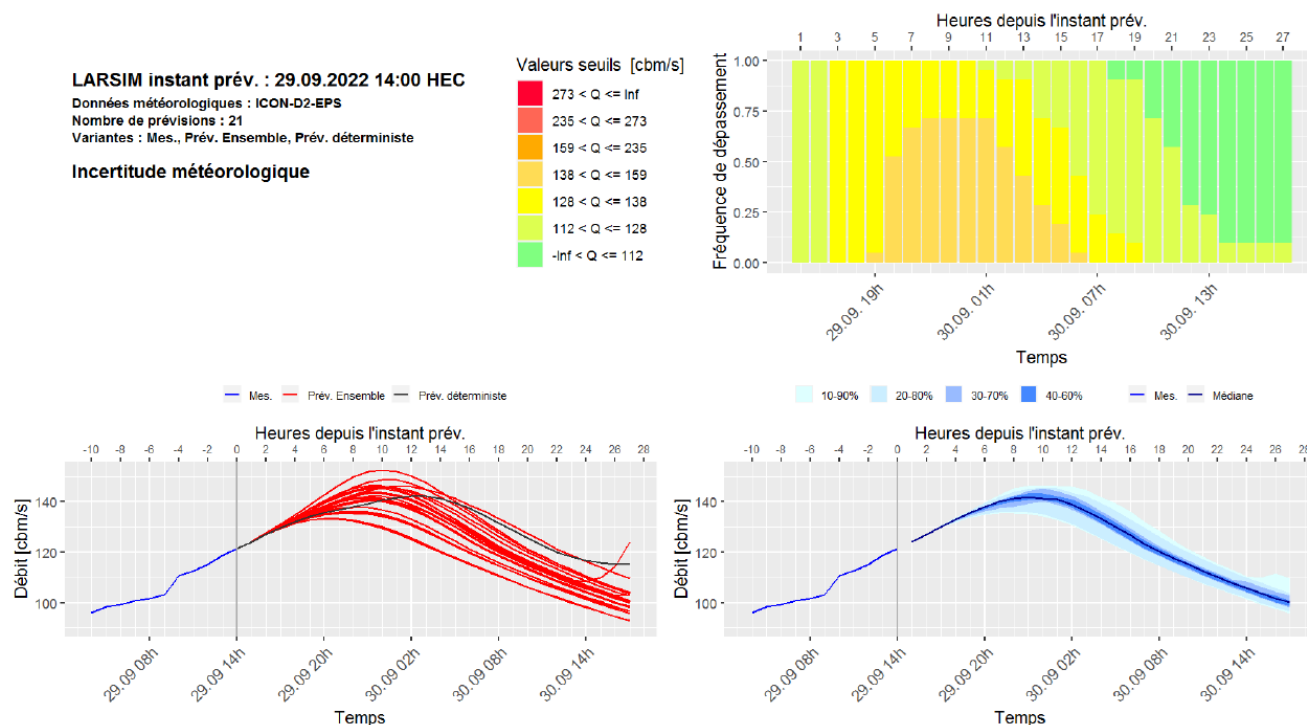


Figure 5. Exemple de résultats d'ensemble superposés avec LARSIM à une station

A titre d'exemple, les conclusions de l'étude sur l'évaluation des prévisions de débit d'ensemble pour la prévision opérationnelle en Rhénanie-Palatinat sur près d'une dizaine de bassins versants (Bartels et al., 2017) ont confirmé une augmentation de la précision des prévisions de débit de l'ordre de 15 à 30 % entre la période 2010 et 2015 à l'aide des prévisions météorologiques à courte échéance COSMO-DE-EPS doté de 20 membres, par rapport aux prévisions déterministes.

Les prévisions météorologiques d'ensemble fournies par Météo-France (MF) (Arôme-PE avec 35 membres et Arpège-PE avec 12 membres) font l'objet de développements constants. Il est prévu de pouvoir également utiliser les données d'ensemble de MF et les ensembles à moyen terme (ENS) de ECMWF dans LARSIM. Actuellement, les prévisions MF déterministes Arôme et Arpège sont déjà utilisées dans les simulations avec LARSIM au SPC Rhin-Sarre, ce qui offre une possibilité supplémentaire d'évaluer l'incertitude des prévisions par rapport à celles du DWD.

## 4. Prévisions régionales avec LARSIM

Dans le cadre du projet de couverture totale du territoire concernant la vigilance « crues », le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI) souhaite mettre en place d'ici à 2030 une vigilance surfacique à échelle infra-départementale regroupant de plus petits cours d'eau à faibles enjeux, en addition aux prévisions dites « linéaires » aux stations le long des cours d'eau.

Outre les prévisions locales aux stations hydrométriques, de telles prévisions régionales sont déjà mises en œuvre avec succès (Johst et Demuth, 2022) en utilisant les résultats de simulation de LARSIM :

- **Prévisions ponctuelles** : La vigilance sur les principaux bassins versants est basée sur des prévisions au droit des stations hydrométriques (voir fig. 5). Comme LARSIM calcule le débit pour chaque ES du modèle, les résultats peuvent être disponibles en tout point du bassin versant modélisé. Ces résultats restent moins fiables dans les petits bassins versants non calés par rapport à ceux obtenus sur les plus grands bassins versants où plusieurs stations hydrométriques sont généralement utilisées pour le calage.
- **Prévisions régionales** : La vigilance sur de plus petits bassins versants généralement situés plus en amont est basée sur une évaluation des prévisions LARSIM par regroupement de ces bassins (alerte précoce des crues) (voir fig. 6). Dès qu'un nombre suffisant de valeurs-seuils de débits statistiques régionalisés est atteint dans les 24 prochaines heures pour différents points de calculs de la région considérée, le niveau d'alerte et la couleur du bassin sont ainsi modifiés (Demuth et Philipp, 2018).  
Pour ce faire, LARSIM calcule 21 prévisions de débit possibles en utilisant l'ensemble DWD dans des exécutions parallèles optimisées en termes de temps de calcul. L'évaluation des 21 cycles LARSIM pour l'alerte précoce par région s'effectue en trois étapes (Demuth et Philipp, 2018) : le débit maximal prévu dans les prochaines 24 heures et sa récurrence est d'abord déterminé pour chacun des 21 cycles de calcul et pour chaque sous-région définie à l'aide de débits régionalisés. Ensuite, la distribution de fréquence des récurrences déterminées est donnée pour l'ensemble des 21 prévisions et pour chaque sous-région, et un ensemble de règles permet d'attribuer la distribution de fréquence à un certain niveau de danger de crue. Enfin, les sous-régions sont affectées aux régions d'alerte et un classement de l'aléa d'inondation est établi pour tous les éléments d'une région d'alerte, à partir duquel l'aléa d'inondation est déduit pour la région d'alerte concernée. Cette approche pour les petits bassins versants a été choisie en raison des incertitudes croissantes dans les prévisions à mesure que le bassin versant diminue et de la disponibilité limitée, peu fiable voire inexistante, des mesures hydrométriques sont limitées.

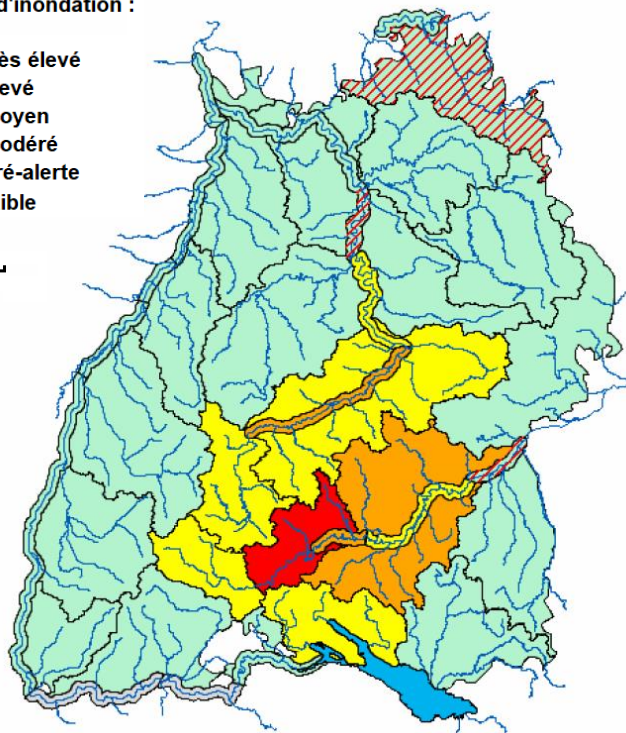
Ainsi, pour des secteurs de prévision moins fournis en données observées, LARSIM peut être utilisé à l'aide d'une approche régionale. A titre d'exemple, les Länder allemands de Bade-Wurtemberg et Rhénanie-Palatinat proposent un service d'abonnement des alertes régionales aux crues sur la base de prévisions semi-automatisées, via l'interface de programmation d'application (API) gratuite des services des prévisions des crues allemands « Meine Pegel ».



Risque d'inondation :



20 km



Calcul des prévisions avec LARSIM et sortie du débit maximal pour les prochaines 24 heures



Détermination de l'annualité des débits maximaux par comparaison avec les débits de crue régionalisés



Détermination de la distribution de fréquence des récurrences HQ pour chaque sous-bassin défini et classification des résultats en cinq niveaux d'alerte



Transfert des niveaux d'alerte déterminés pour les sous-régions vers les régions d'alerte, par exemple au moyen d'une valeur maximale ou d'un percentile librement choisi de toutes les valeurs d'alerte.

Figure 6. Carte d'alerte régionale de crues fictive en fonction du découpage des bassins versants amonts et fluviaux (LUBW, 2023) et étapes de la création de la carte d'alerte régionale

## 5. Conclusions

En raison de l'intensification des processus atmosphériques due au changement climatique, il est nécessaire, pour la prévision des débits, d'utiliser un programme capable de calculer non seulement les crues fluviales, mais aussi les crues soudaines en tenant compte des informations locales sur le sol. Dans le LARSIM, des approches sont mises en oeuvre pour le calcul des crues fluviales et des crues soudaines, et le modèle est ainsi déjà utilisé dans différents centres de prévision des crues. La condition préalable à la mise en place du module de calcul de l'excédent d'infiltration dynamique pour le calcul des crues soudaines dans LARSIM est la présence de données pédologiques, sachant que davantage de données pédologiques sont nécessaires que pour l'approche de l'infiltration à saturation pour le calcul des crues fluviales.

Le couplage des prévisions déterministes météorologiques avec les prévisions d'ensemble dans la prévision opérationnelle avec LARSIM permet en outre d'améliorer l'évaluation qualitative de l'incertitude de la prévision et d'analyser la marge potentielle de la crue à venir. Cela aide à décider où il faut s'attendre le plus probablement à des inondations dans la région.

Outre les prévisions hydrologiques pour les grands fleuves et les crues soudaines, le programme permet également de calculer des alertes régionales à l'échelle de petits bassins versants. L'alerte précoce régionale aux crues, implémentée sur la base des calculs LARSIM, offre également la possibilité de réduire l'incertitude sur la localisation exacte des événements pluvieux (en particulier les événements convectifs) et l'incertitude dans la modélisation hydrologique des petits bassins versants.

Les nombreuses options de calcul permettent d'utiliser LARSIM dans différentes situations hydrologiques, ce qui suppose de solides connaissances techniques. L'expérience acquise au SPC Rhin-Sarre montre que LARSIM s'est révélé être un outil éprouvé pour l'élaboration des cartes de vigilance.

## Références :

- Bartels J., Bliefernicht J., Seidel J., Bárdossy A., Kunstmann H., Johst M., Demuth N., 2017. *Bewertung von Ensemble-Abflussvorhersagen für die operationelle Hochwasserwarnung*. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung ISSN: 1439-1783, Jg.61, Nr. 5, 2017
- Beven J., 2012. *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. John Wiley & Sons, New York; 2. Auflage.
- Bremicker M. (2000): *Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele*. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11. Institut für Hydrologie der Universität Freiburg.
- Bremicker M., Brahmer G., Demuth N., Holle F.-K. & I. Haag 2013. *Räumlich hoch aufgelöste LARSIM Wasserhaushaltsmodelle für die Hochwasservorhersage und weitere Anwendung*. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 6 (9), 509–519.
- Demuth N. et Philipp A., 2018. *Hochwasserfrühwarnung: gemeinsamer Beitrag aus Sachsen und Rheinland-Pfalz*. In: WasserWirtschaft 108 (2018), Nr. 12, S. 20-24
- Gerlinger, K. et Demuth N. 2001. *The LARSIM model of the Moselle river basin as an example of flood forecasting in a transboundary water system*. IHP/OHP-Berichte Sonderheft 12 "Hydrological Challenges in Transboundary Water Resources Management", Koblenz, S. 219–222.
- Green W.H. et Ampt G.A. 1911. *Studies in soil physics. 1 The flow of air and water through soils*. Journal of Agriculture Science, 4, 1–24.
- Haag I., Johst M., Sieber A. & M. Bremicker, 2021. *Leitfaden zur Kalibrierung von LARSIM-Wasserhaushaltsmodellen für den operationellen Einsatz in der Hochwasservorhersage*. LARSIM-Entwicklergemeinschaft.
- Haag I., Aigner D., Krumm J., Regenauer J., Steinbrich A., Weiler M., Sieber A. & M. Bremicker, 2019. *Simulation von Hochwassern in der Folge von Starkregen mit LARSIM – ein Beispiel für die zielführende Nutzung vorhandener Bodendaten*. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 41.19, S. 105–110.
- Haag I., Krumm J., Aigner D., Steinbrich, A. & M. Weiler, 2022. *Simulation von Hochwasserereignissen in Folge lokaler Starkregen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM*. Hydrologie & Wasserbewirtschaftung, 66, (1), 6-27., DOI: 10.5675/HyWa\_2022.1\_1
- Johst M. et Demuth N. 2022. *Hochwasserfrühwarnung in Rheinland-Pfalz* In: WasserWirtschaft 112 (2022), Nr. 10, S. 22-26
- LEG – LARSIM Entwicklergemeinschaft 2022. *Le modèle de bilan hydrologique LARSIM – Bases du modèle et exemples opérationnels –*  
[https://www.larsim.info/fileadmin/files/Dokumentation/Doku\\_LARSIM\\_Francais\\_2022.pdf](https://www.larsim.info/fileadmin/files/Dokumentation/Doku_LARSIM_Francais_2022.pdf)
- LUBW, 2023. *Hinweise zur Hochwasserwarnkarte*. <https://www.hvz.baden-wuerttemberg.de/>
- Peschke G., 1985. *Zur Bildung und Berechnung von Regenabfluss*. Wissensch. Zeitschrift der TU Dresden, Nr. 34(4), 195–200.
- Steinbrich A., Leistert H. et M. Weiler, 2016. *Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution*. Environ. Earth Sci. (2016) 75, 1423.
- Todini E., 1996. *The ARNO rainfall-runoff model*. Journal of Hydrology, 175, 339–382.
- Wu W., Emerton R., Duan Q., Wood A., Wetterhall F., Robertson D., 2020. *Ensemble flood forecasting: Current status and future opportunities*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water 7(D20)
- Zhao R.J, 1977. *Flood forecasting method for humid regions of China*. East China Institute of Hydraulic Engineering, Nanjing, China.