

La figure suivante présente la topographie de la galerie et la position des drains (au fond de la galerie).

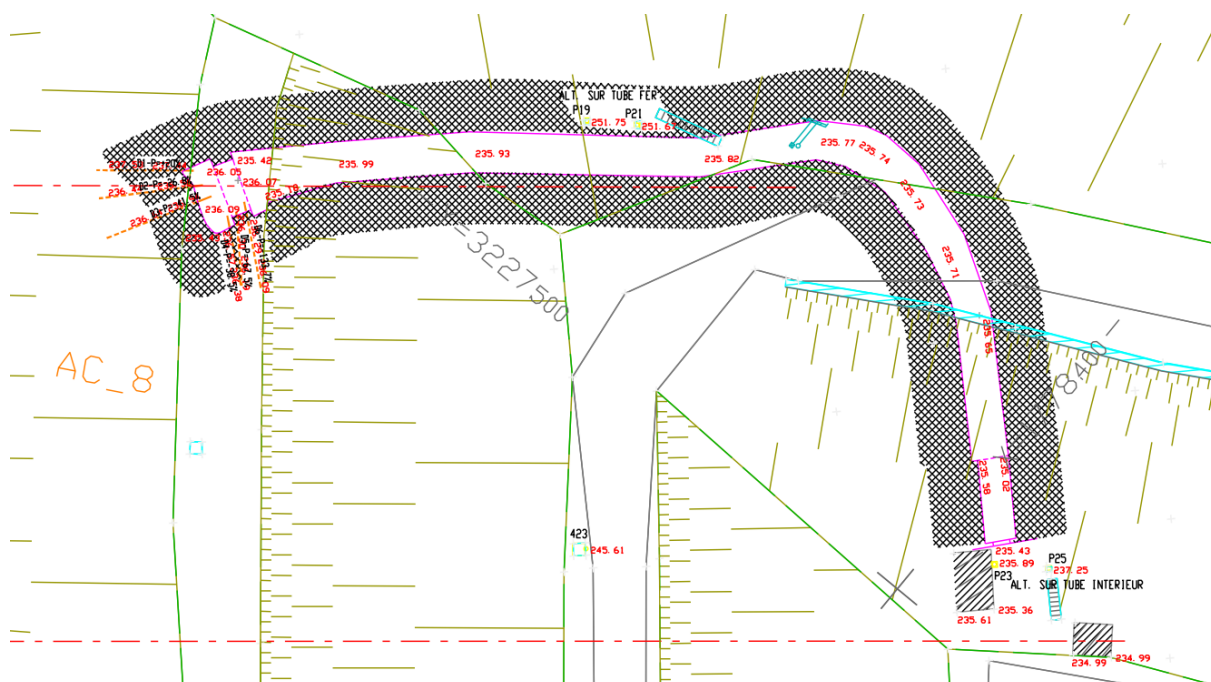


Figure 8-16 : Topographie de la galerie

Le fil d'eau de la galerie est calé à environ 235,5 m NGF. Le toit est calé environ 2 m plus haut soit 237,5 m NGF.

Au droit du barrage, le recouvrement par le substratum sain (mais fracturé) entre le toit de la galerie et l'interface BCR/versant est supérieur à 15 m. Dans cette configuration, il est considéré que le décapage prévu au droit du barrage ne peut affecter la galerie.

Il en est de même pour les excavations au rocher près de l'entrée de la galerie qui sont situés à plus de 35 m du passage de la galerie sous le barrage.

Dans ces conditions, il est considéré que les excavations, si elles peuvent conduire à des désordres vers l'entrée de la galerie (chute de bloc) :

- ne peuvent pas remettre en cause sa capacité de drainage pour des débits de fuite qui restent inférieurs à quelques l/s ;
- ne peuvent conduire à un effondrement sous le barrage susceptible d'altérer ses conditions de stabilité.

Toutefois, il est recommandé de procéder à une inspection régulière de la galerie pendant les travaux pour repérer d'éventuels désordres.

8.4.7 STABILITE DU BARRAGE PENDANT LES TERRASSEMENTS

On rappelle que la stabilité du barrage pendant la phase de terrassement a fait l'objet d'un calcul vérificatif selon les recommandations du CFBR (cf. 5.2.2).

9 RUBRIQUE 9 : ETUDE DE REDUCTION DES RISQUES

9.1 SYNTHESE DES MODES DE RUPTURE DE L'ETAT ACTUEL

BRLi a produit en 2023 une mise à jour de l'EDD dans l'état actuel de l'ouvrage (réf : A00807-SCE-EDD2022-Rapport-principal).

Les évènements redoutés centraux ERC1.1 (rupture par érosion externe par surverse) et ECR1.3 (instabilité) sont considérés en zone rouge.

Les travaux présentés dans le cadre de la présente EDD permettent de les replacer en zone verte.

9.2 SYNTHESE DES MODES DE RUPTURE COMPLEMENTAIRES ANALYSES

L'EDD relève du cas 2. La présente rubrique synthétise l'ensemble de la démonstration de la maîtrise des risques du barrage une fois construit ou modifié.

Les modes de rupture suivants ont été étudiés par le calcul :

- Etude de stabilité interne du BCR
- Etude de stabilité à l'équilibre limite en prenant en compte des combinaisons extrêmes de défaillance (crue et défaillance du BCR et de la membrane) > ERC_A
- Erosion externe par surverse en crête ou débordement du coursier au moyen d'une modélisation physique et d'une modélisation numérique 3D
- Erosion externe par affouillement du pied aval au moyen des approches d'Anandale et Pells et de la modélisation numérique 3D
- Stabilité externe du bloc inférieur du parement en BCR en tenant compte d'une combinaison extrême (crue de T=10 000 ans et rupture du barrage des Cambous) > ERC_B

Par ailleurs, les modes de rupture suivant ont fait l'objet d'une analyse de risque :

- Erosion externe par surverse sur la RN106
- Erosion interne du remblai du barrage
- Erosion par surverse par surverse à la suite du contournement de la drome par des embâcles
- Erosion par surverse par surverse à la suite de l'obstruction de l'évacuateur par des embâcles originaires de l'aval de la drome
- En phase chantier :
 - Erosion du remblai par surverse en phase chantier > ERC_C
 - Instabilité du remblai pendant les terrassements > ERC_D
 - Effondrement de la galerie de drainage pendant les travaux

9.3 SYNTHESE DE LA CRITICITE

Pour les modes de rupture ayant fait l'objet de calculs conformes aux exigences de l'ATB ou aux recommandations du CFBR, on considéra que la criticité est satisfaisante. La grille de conformité à l'ATB a été présentée dans le bilan de conception au § 5.3.

Pour les mode de rupture ayant fait l'objet d'analyse des risques s'appuyant sur des arbres, les probabilités de défaillance ont été estimées $< 10^{-4}$.

Le tableau suivant positionne les ERC dans la matrice de criticité :

- ERC_A : rupture par instabilité après travaux en prenant en compte des combinaisons extrêmes de défaillance,
- ERC_B : rupture par instabilité externe du bloc inférieur du parement en BCR en tenant compte d'une combinaison extrême (crue de T=10 000 ans et rupture du barrage des Cambous),
- ERC_C : Rupture par surverse sur le remblai en phase chantier en tenant compte d'une crue extrême pendant la phase la plus critique,
- ERC_D : Rupture par instabilité du remblai du barrage pendant les terrassements.

		1 - Faible	2 - Modéré	3 - Sérieux	4 - Important	5 - Catastrophique
Probabilité très faible	10^{-4}					ERC_A ERC_B ERC_C ERC_D
Probabilité faible	10^{-3}					
Probabilité moyenne	10^{-2}					
Probabilité élevée	10^{-1}					
Probabilité très élevée						

Les analyses produites conduisent donc à considérer les criticités des différents ERC sont satisfaisantes.

9.4 MESURES D'AMELIORATION

Le document d'organisation sera transmis au préfet 3 mois avant le démarrage des travaux. Il devra intégrer :

- la description de la vigilance hydrométéorologique,
- la matrice PPI et les actions relatives à la surveillance et l'alerte prévues pour les différents seuils en fonction des différentes phases du chantier,
- une visite régulière de la galerie (1 à 2 fois par semaine) pendant les travaux par le Maître d'œuvre ou par l'exploitant,

10 RUBRIQUE 10 : CARTOGRAPHIE

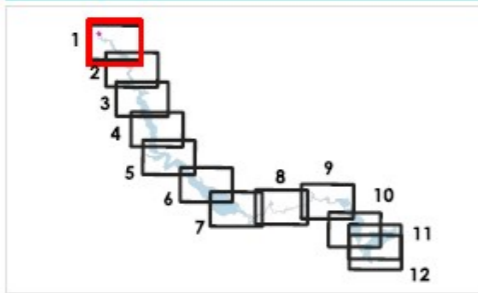
10.1 CARTOGRAPHIE DU PROJET

Se référer au document annexe 3 (cartographie) du PROJET

10.2 CINETIQUE ET OCCUPATION DES SOLS EN AVAL DU BARRAGE

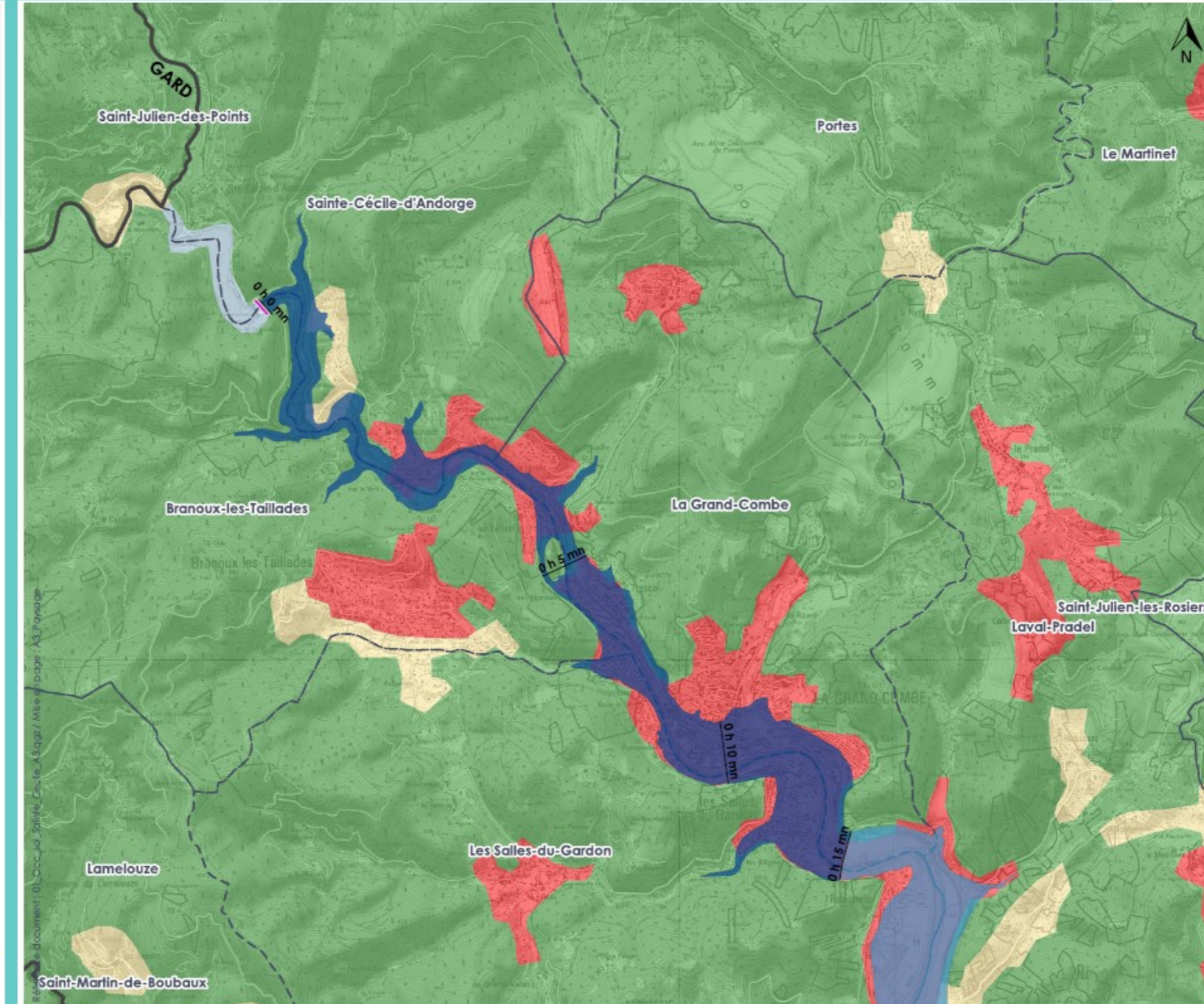
Onde de rupture du barrage de Sainte Cécile d'Andorge

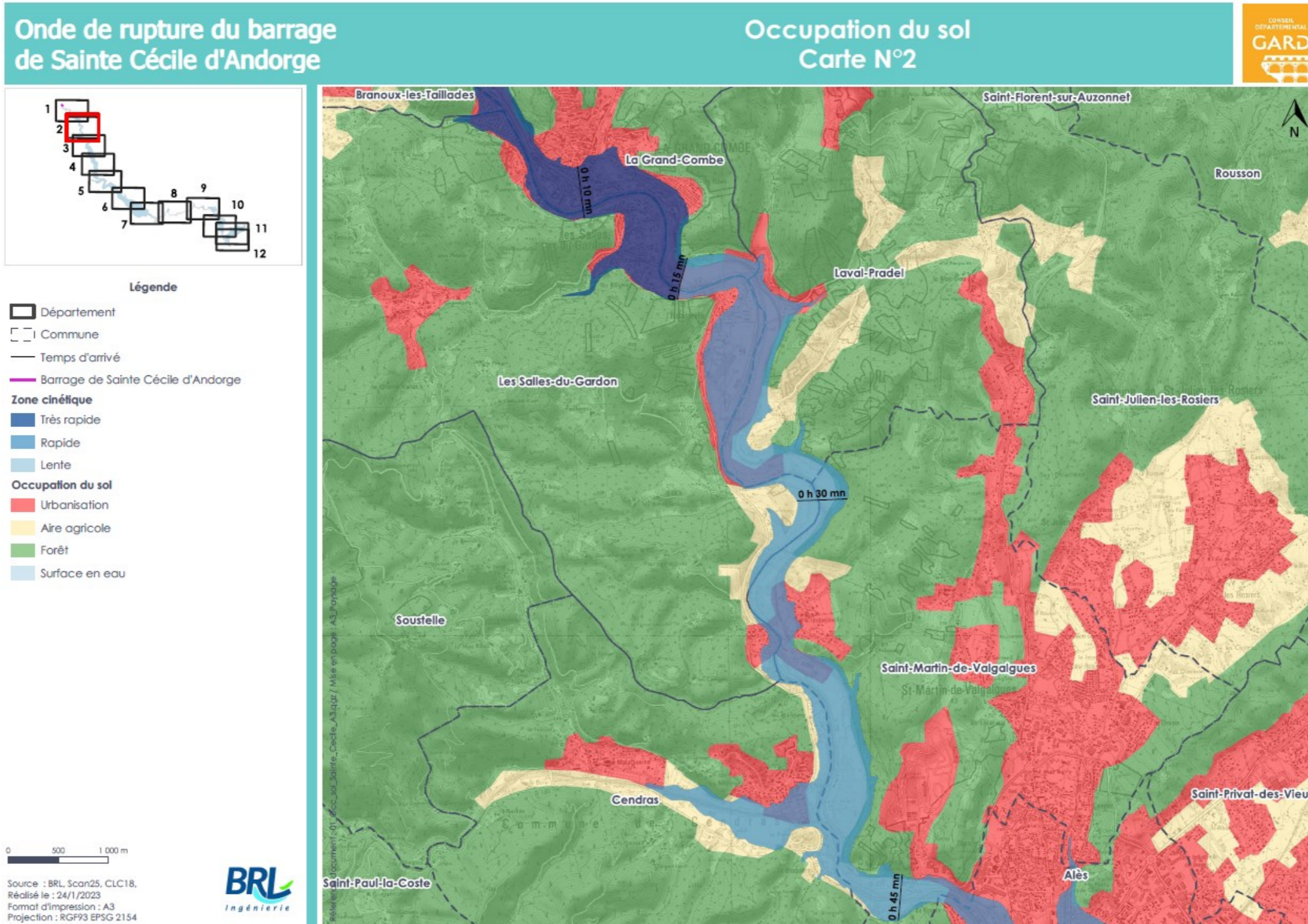
Occupation du sol Carte N°1

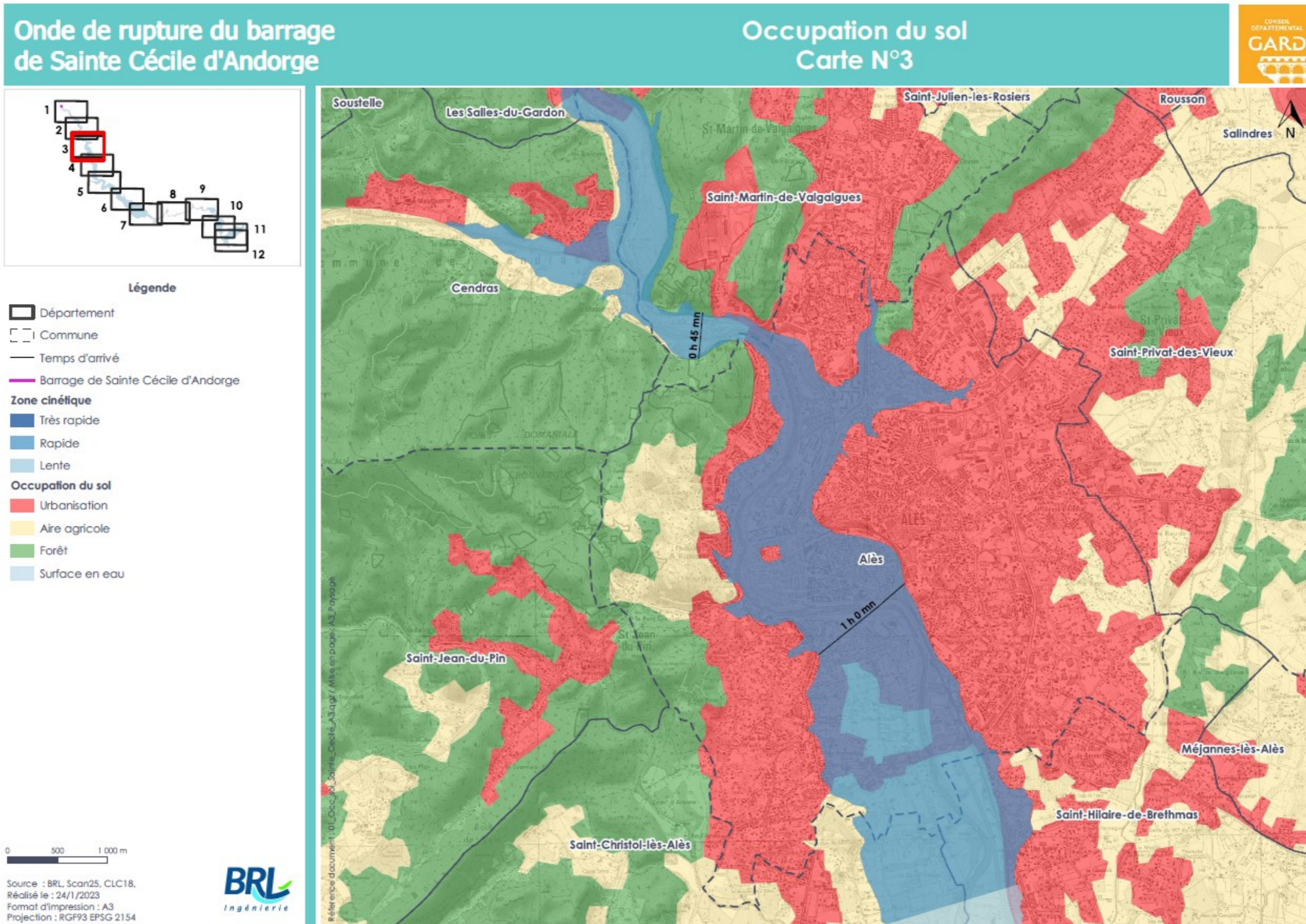


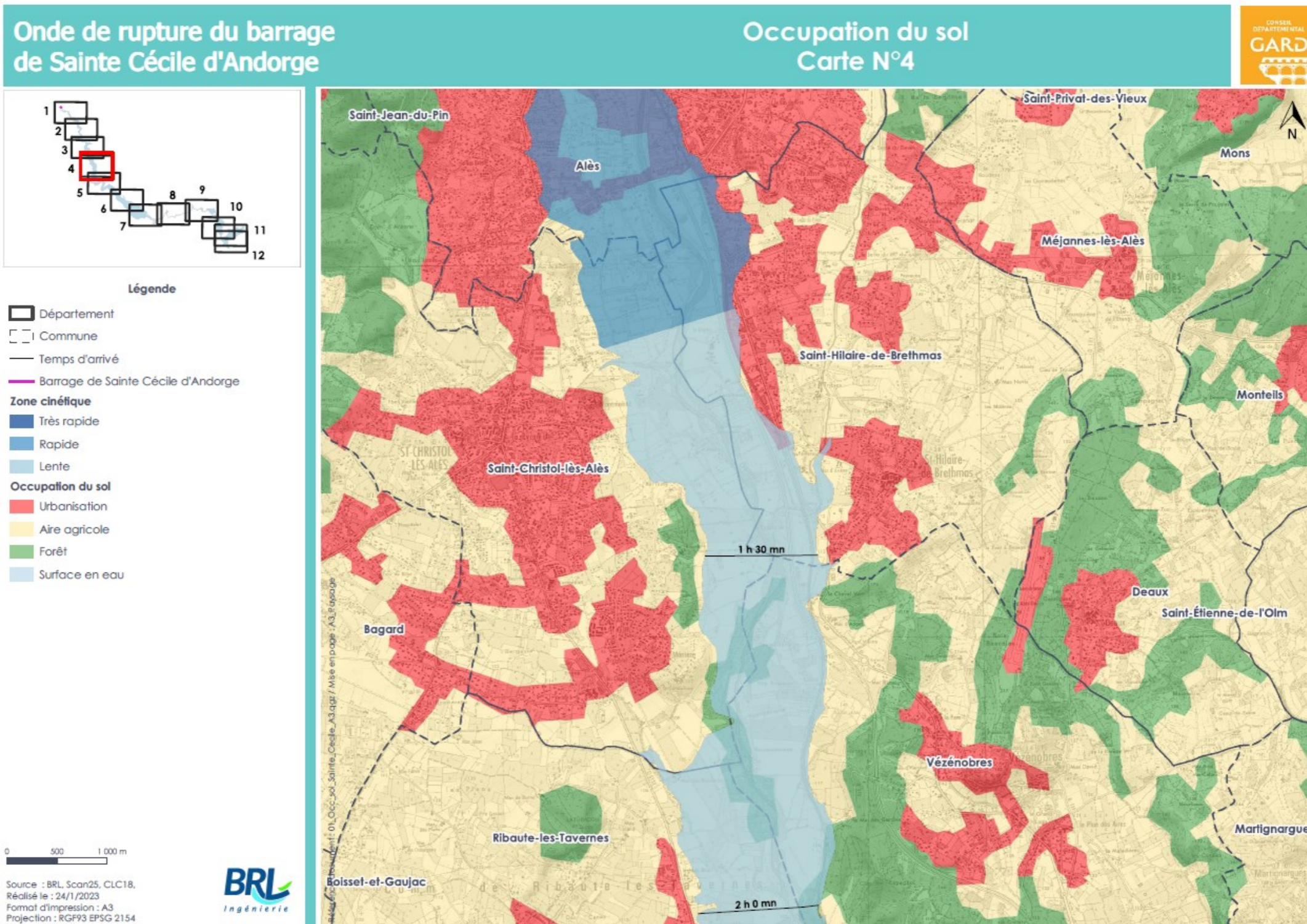
- Légende**
- Département
 - Commune
 - Temps d'arrivée
 - Barrage de Sainte Cécile d'Andorge
 - Zone cinétique**
 - Très rapide
 - Rapide
 - Lente
 - Occupation du sol**
 - Urbanisation
 - Aire agricole
 - Forêt
 - Surface en eau

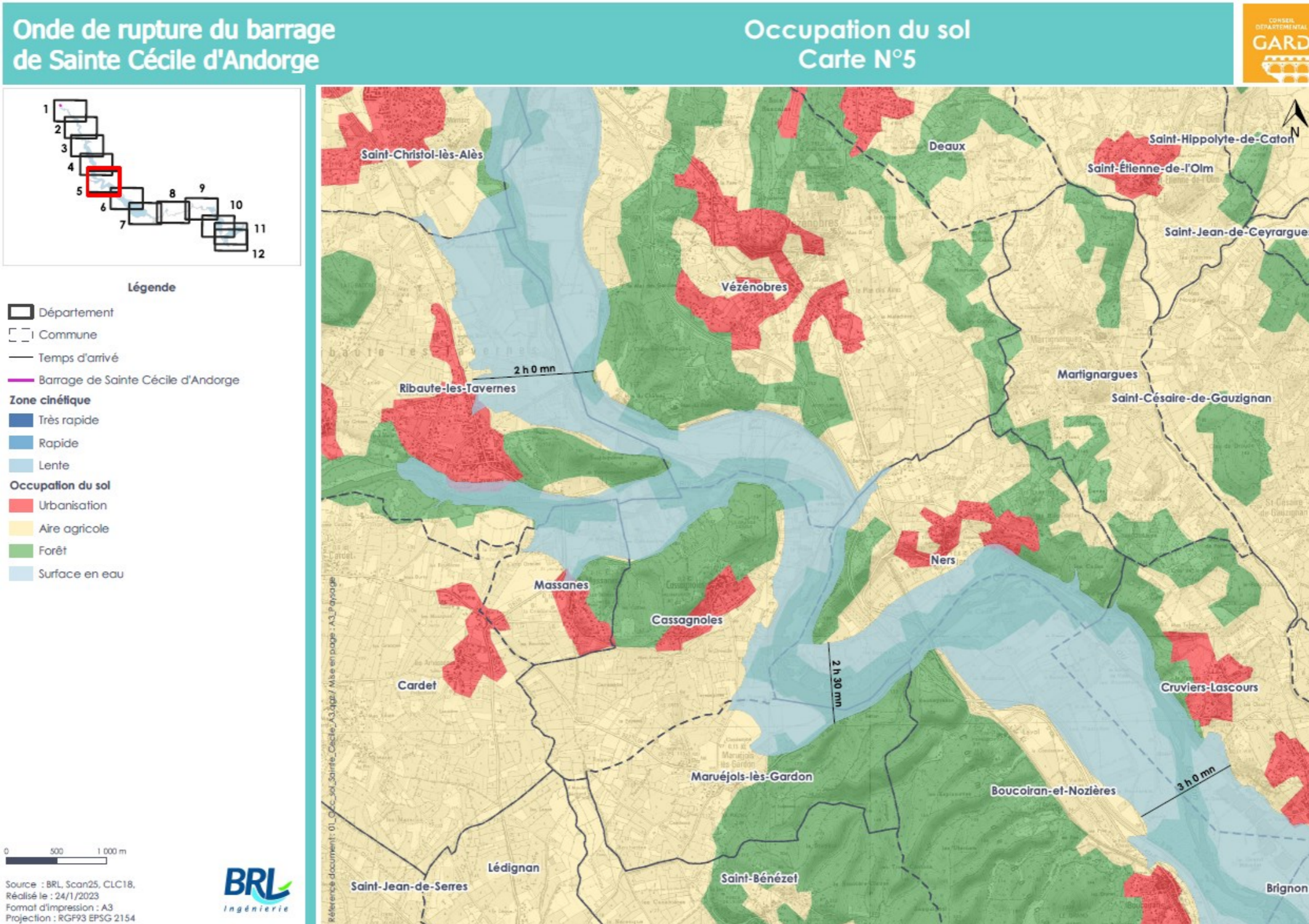
0 500 1 000 m
Source : BRL, Scan25, CLC18,
Réalisé le : 24/1/2023
Format d'impression : A3
Projection : RGF93 EPSG 2154

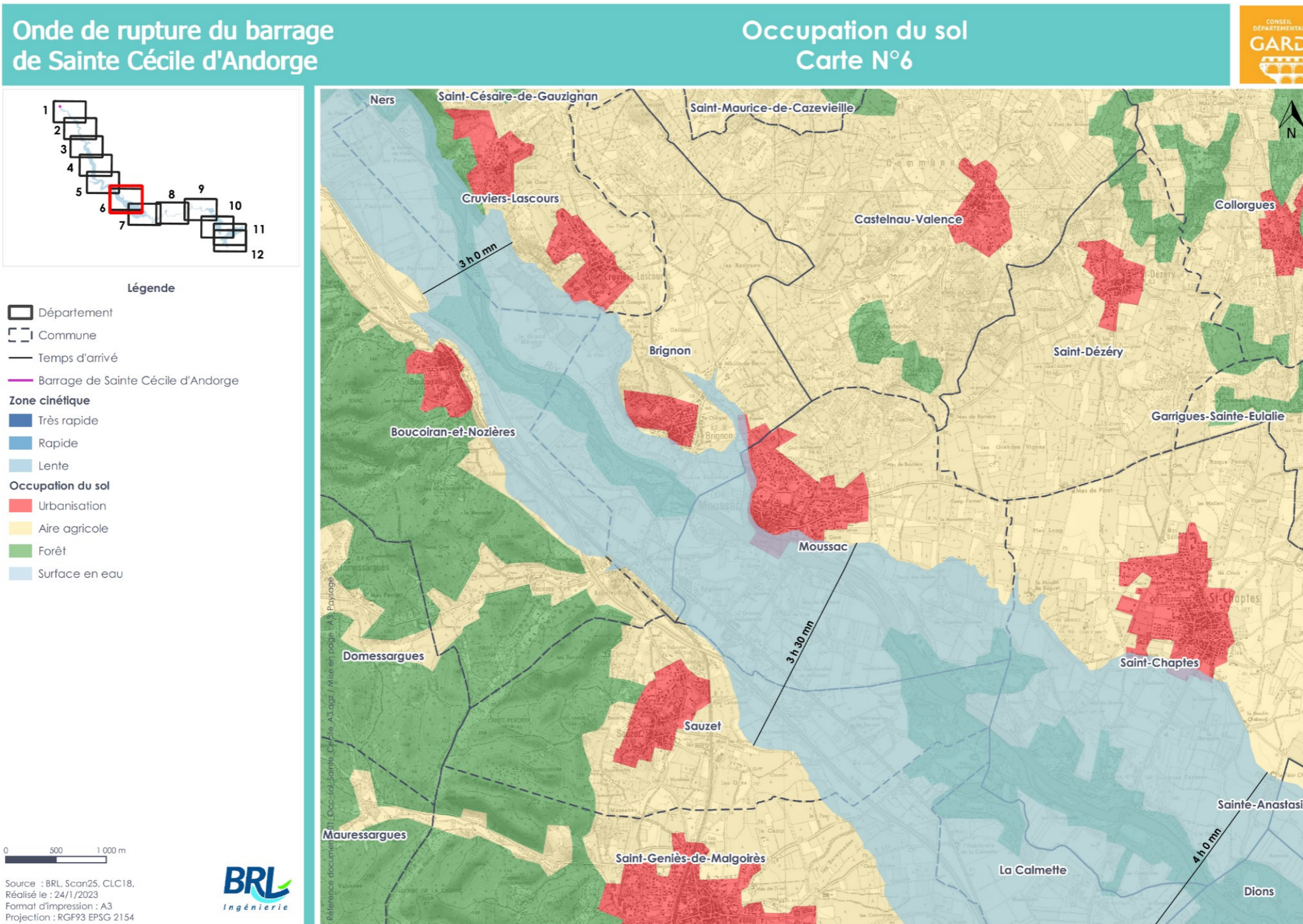


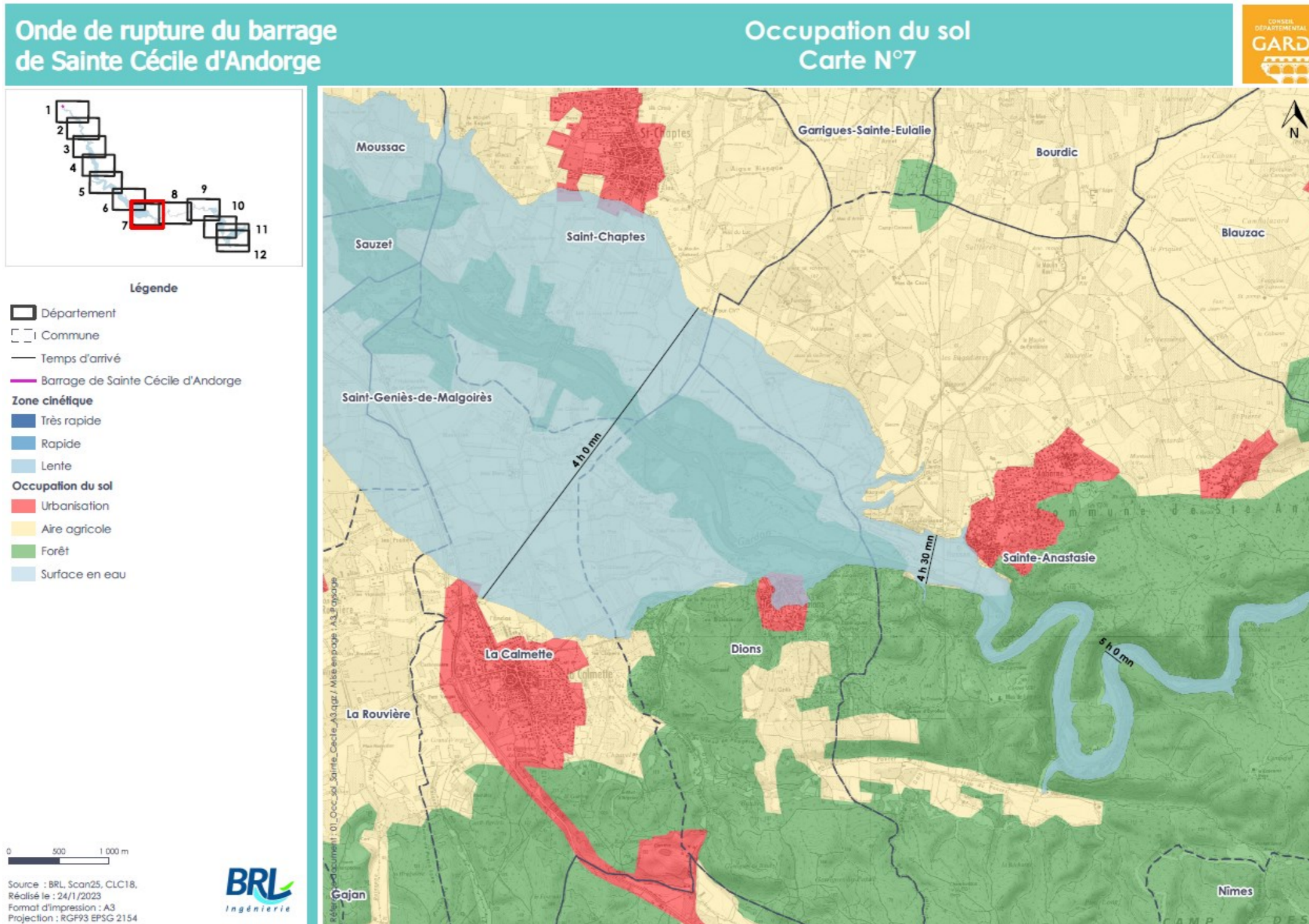


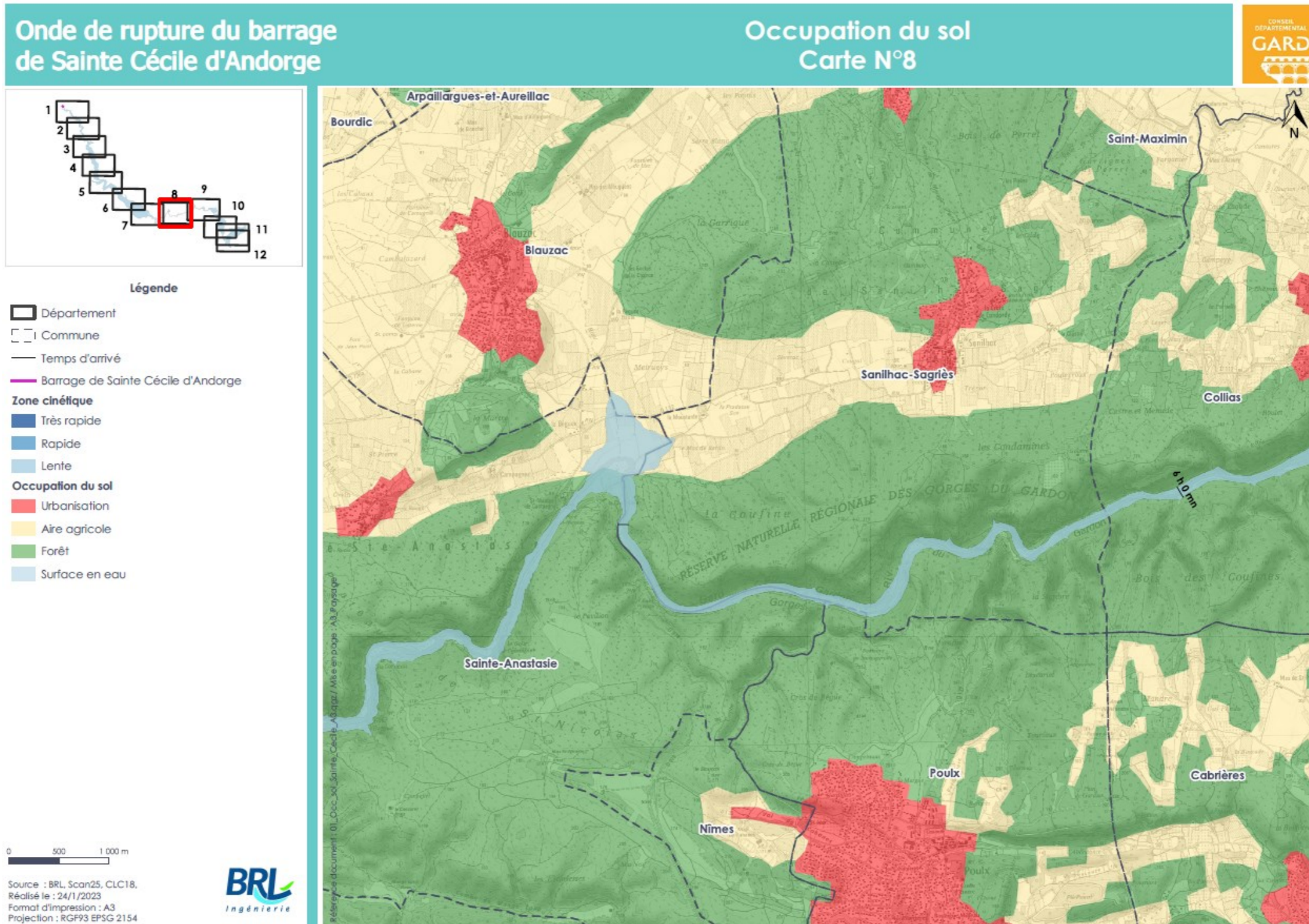


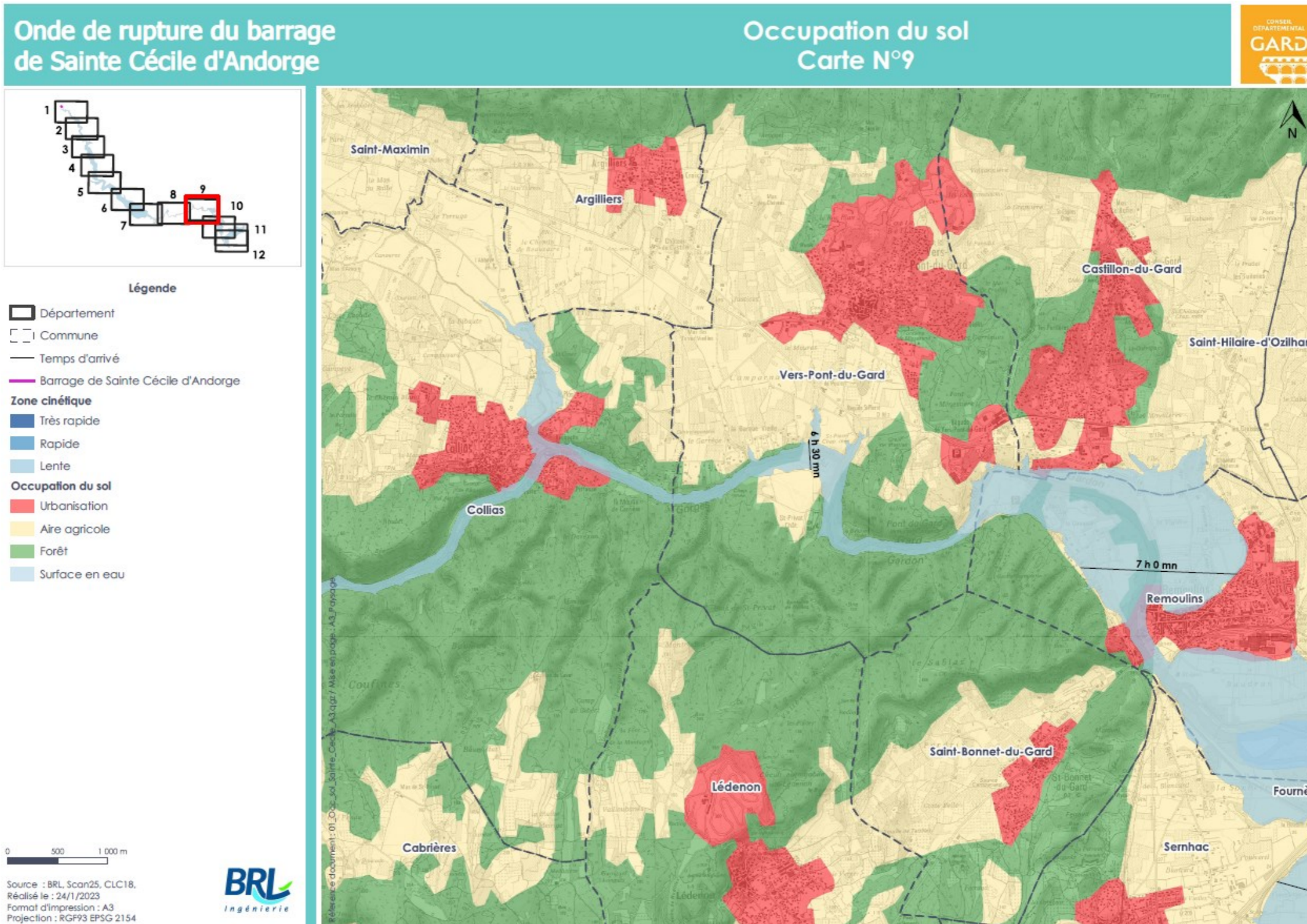


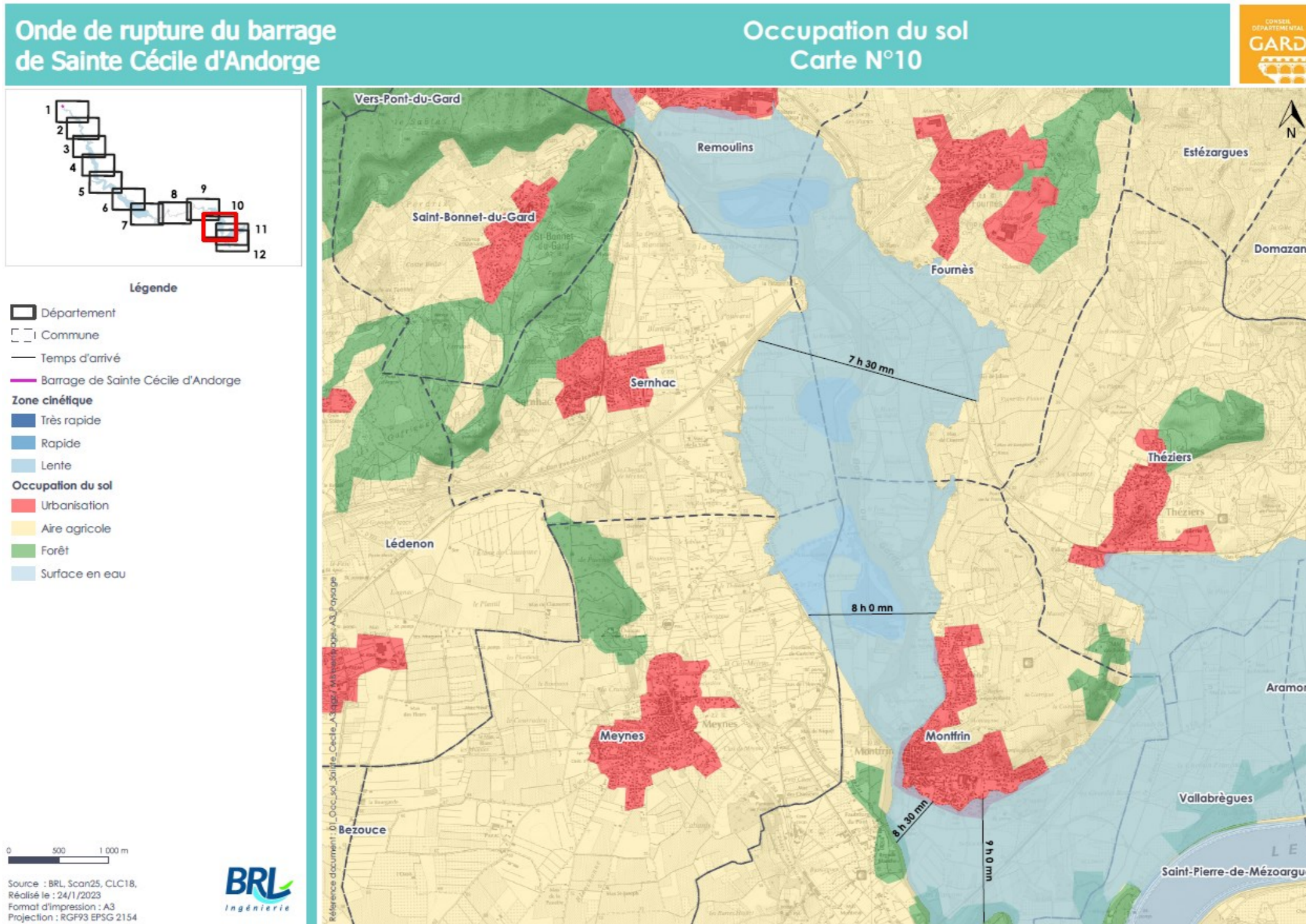


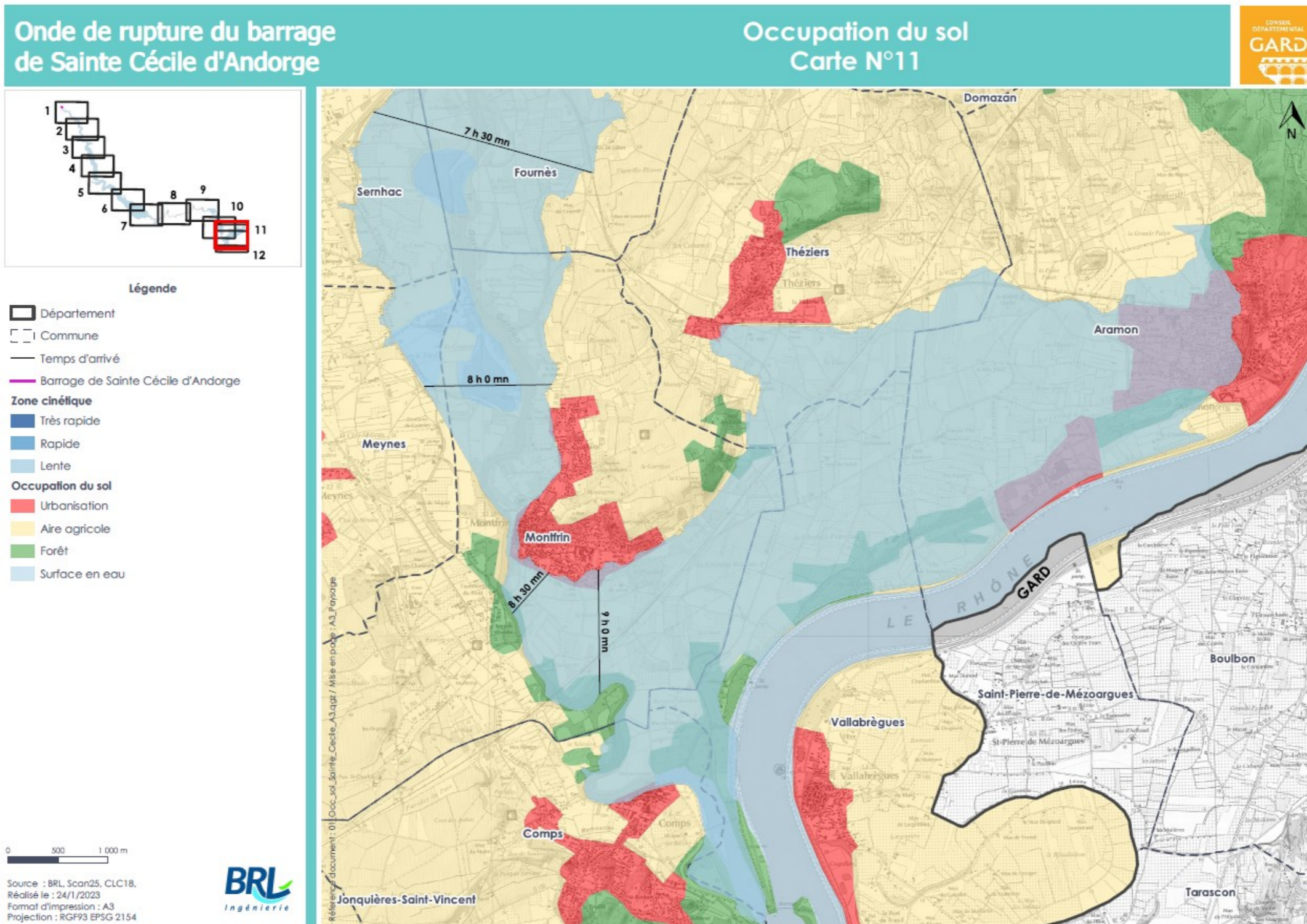


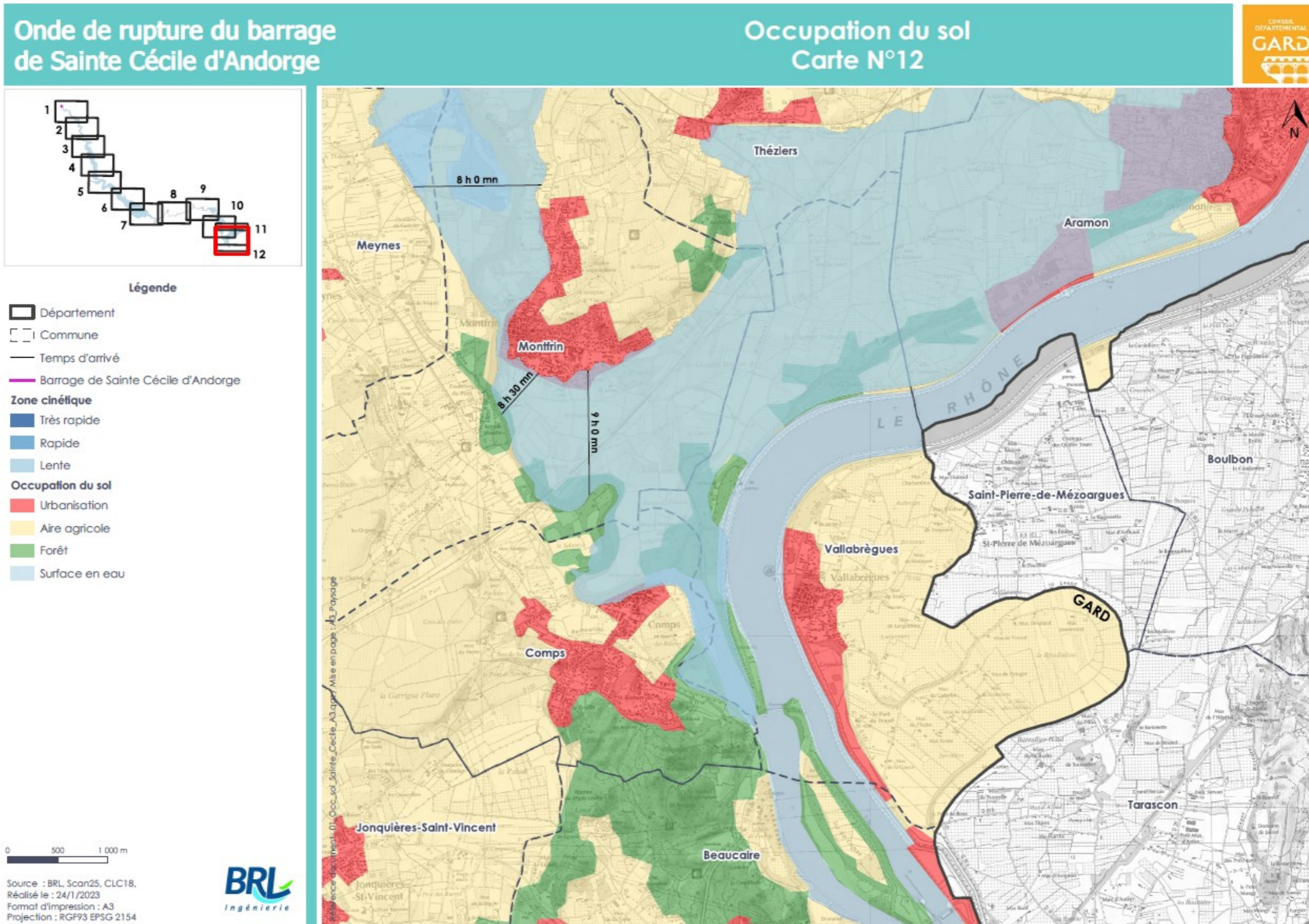




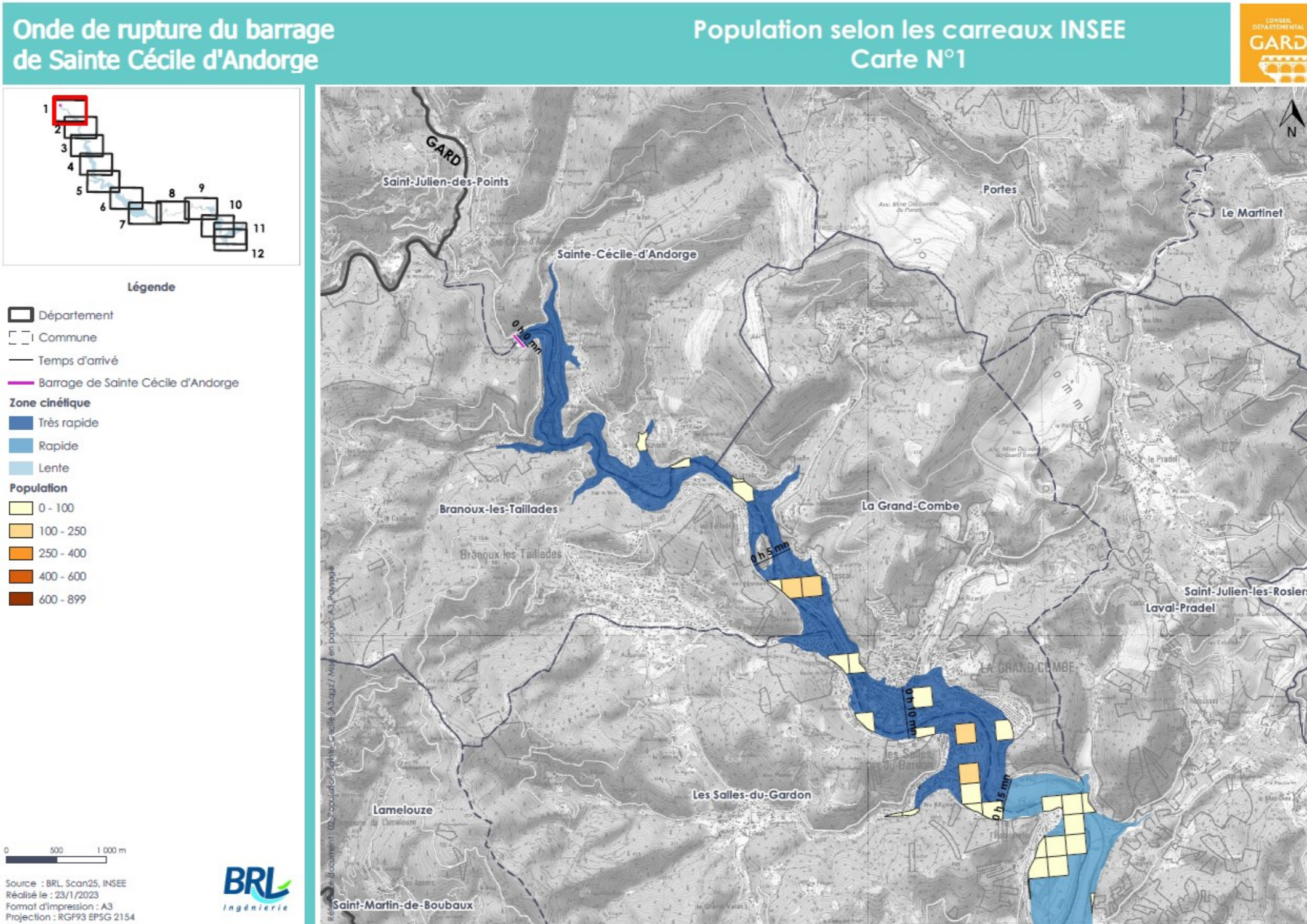


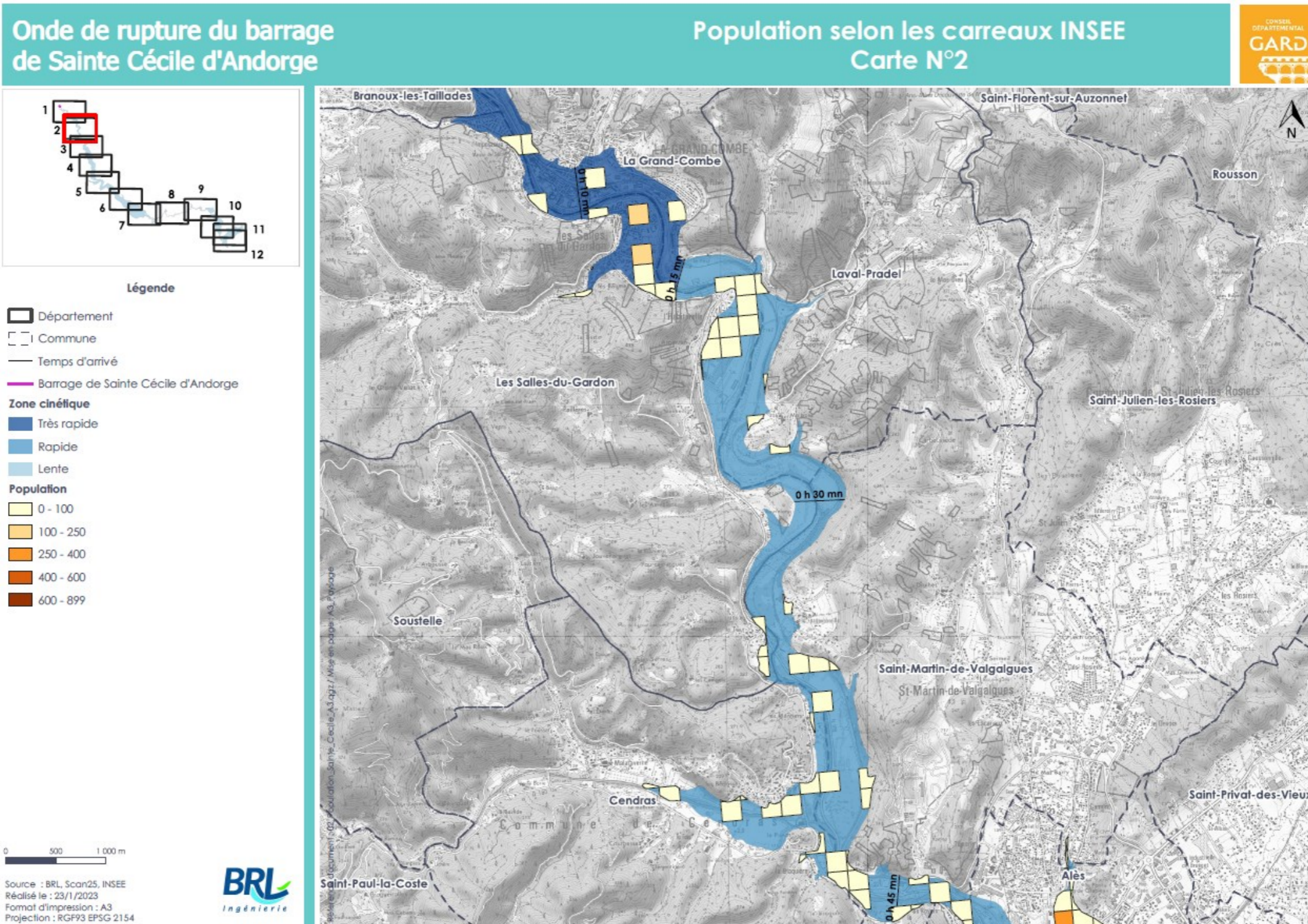


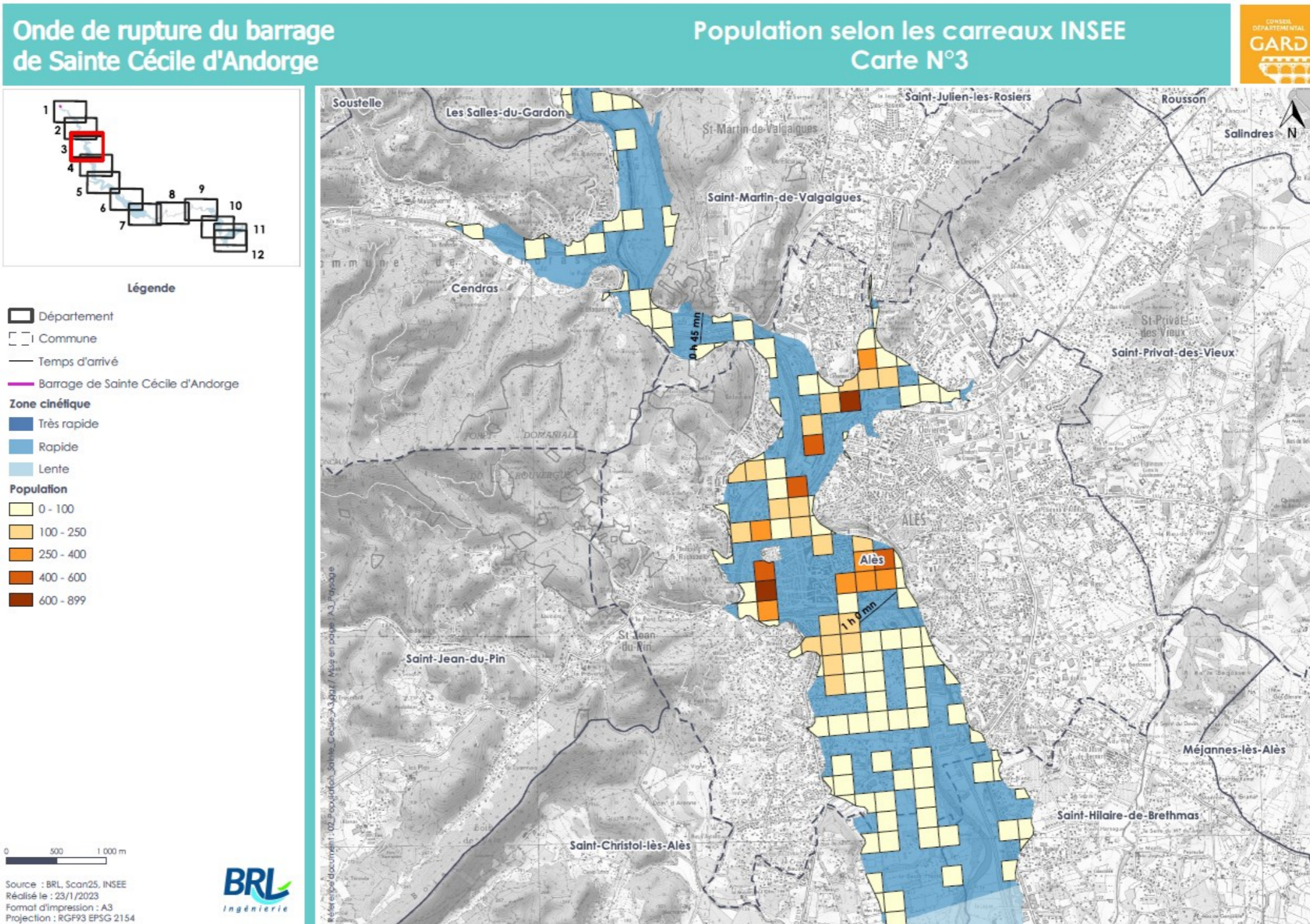




10.3 CINETIQUE ET POPULATUION INSEE EN AVAL DU BARRAGE

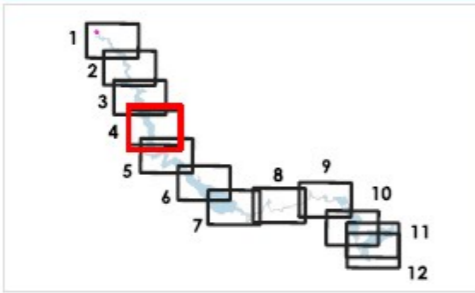






Onde de rupture du barrage de Sainte Cécile d'Andorge

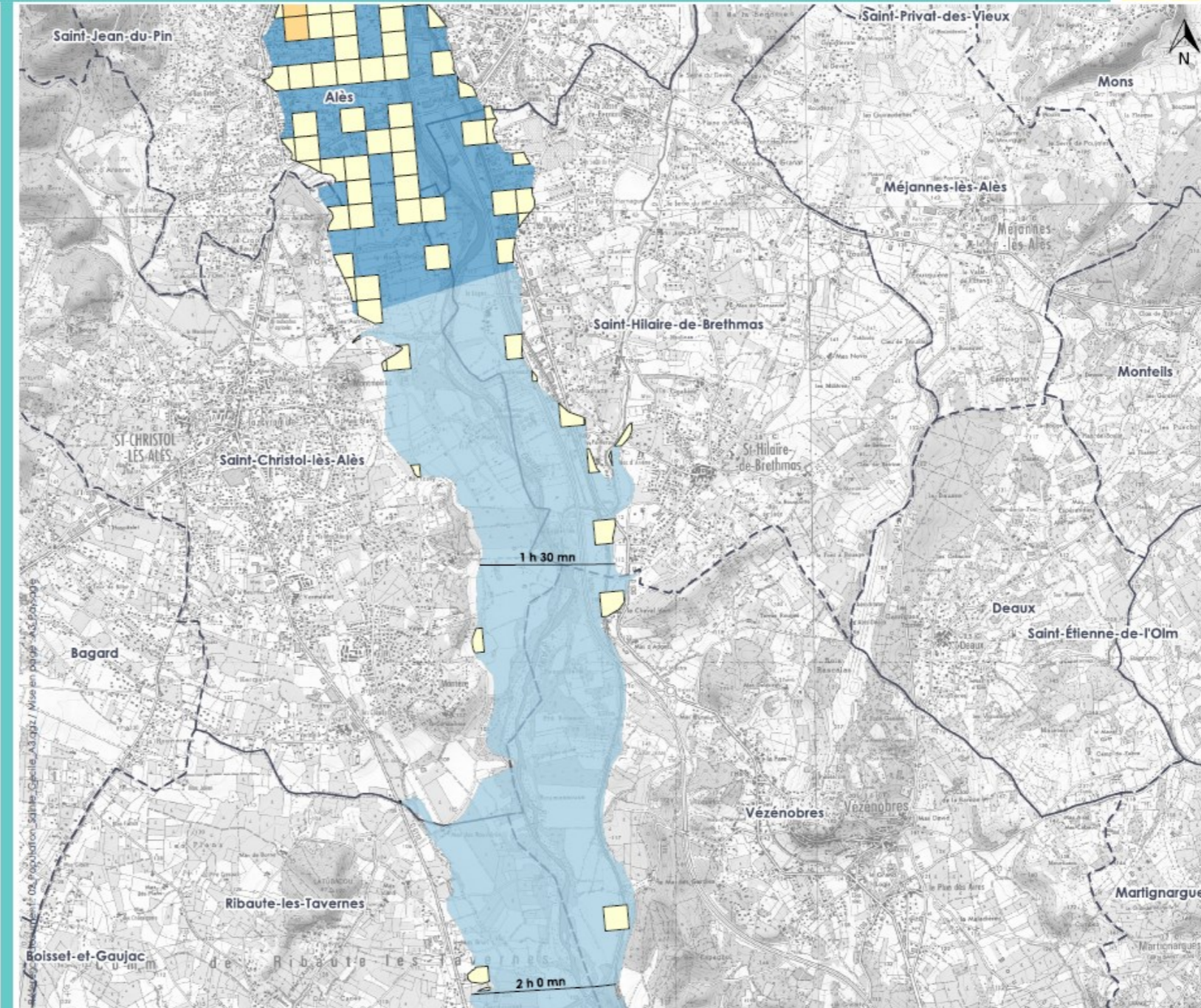
Population selon les carreaux INSEE Carte N°4

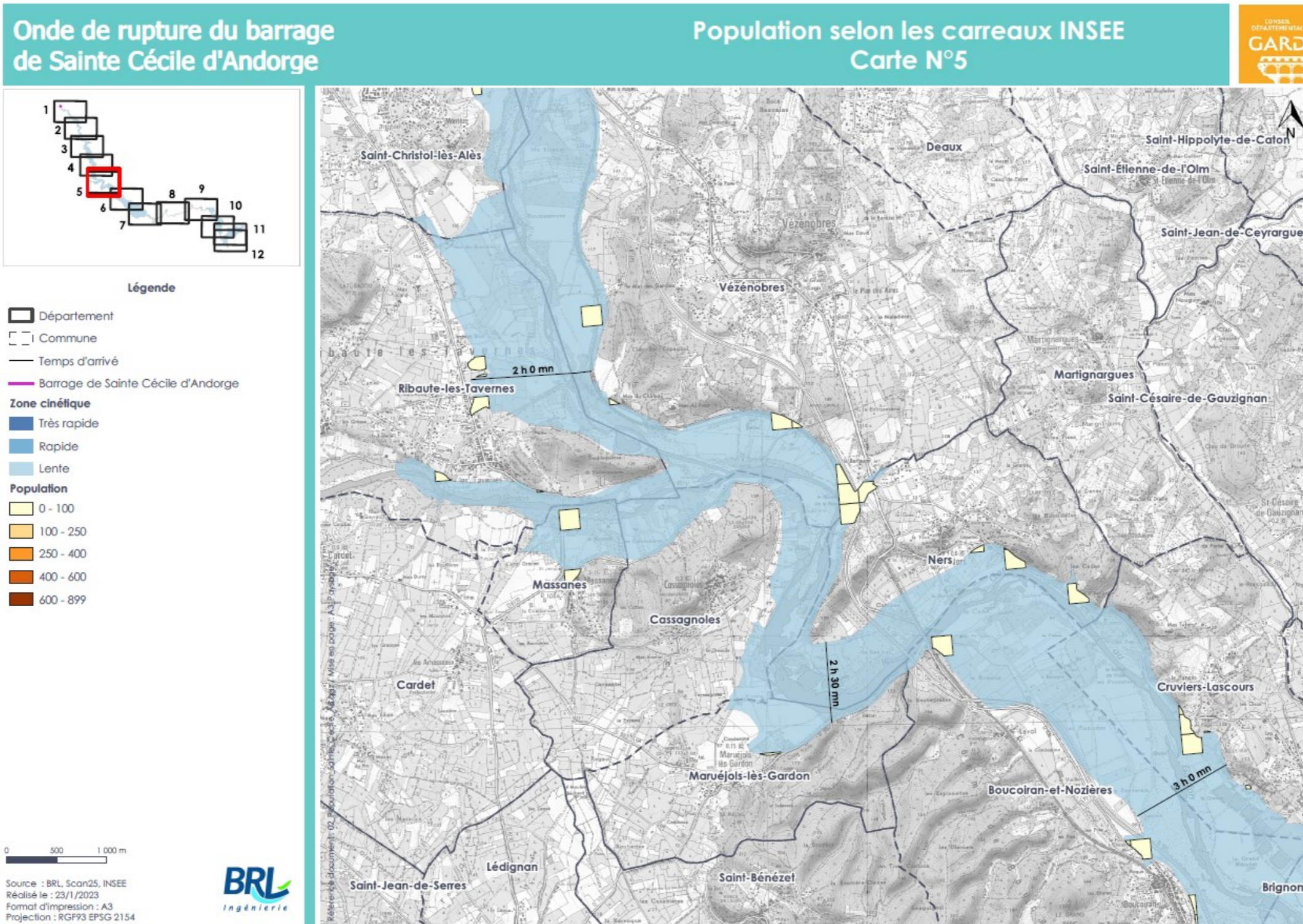


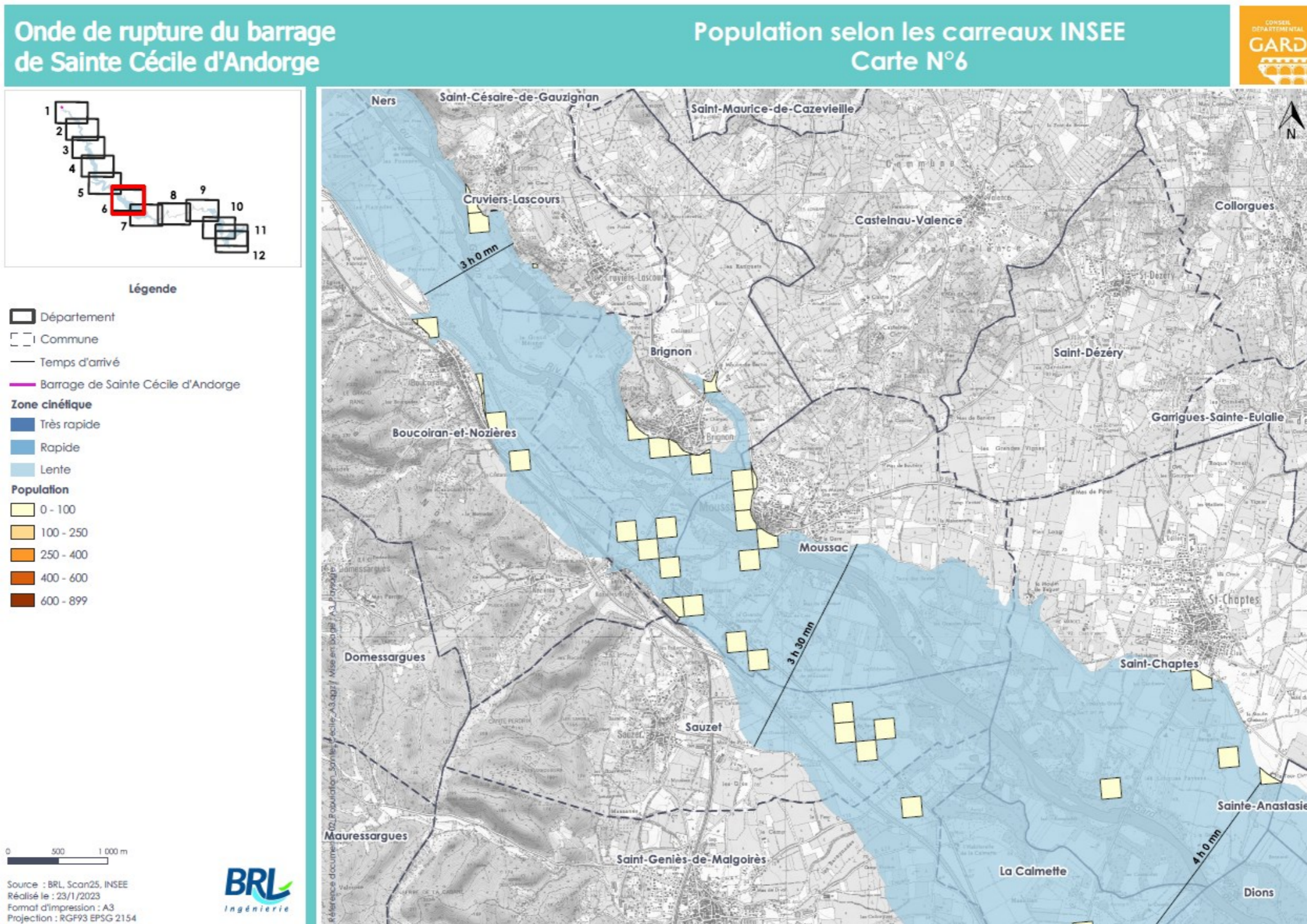
- Légende**
- Département
 - Commune
 - Temps d'arrivé
 - Barrage de Sainte Cécile d'Andorge
 - Zone cinétique**
 - Très rapide
 - Rapide
 - Lente
 - Population**
 - 0 - 100
 - 100 - 250
 - 250 - 400
 - 400 - 600
 - 600 - 899

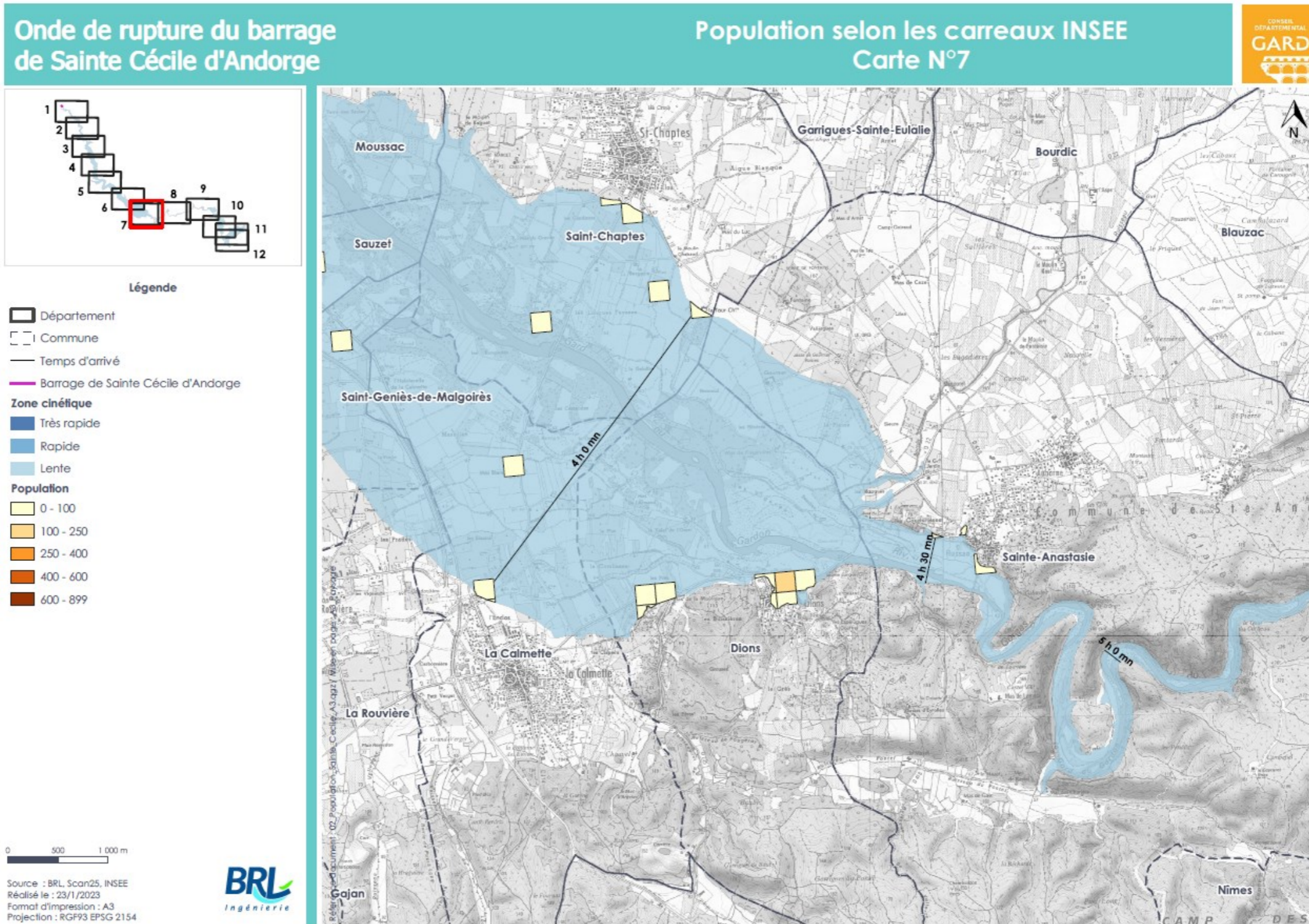
0 500 1 000 m

Source : BRL, Scan25, INSEE
 Réalisé le : 23/1/2023
 Format d'impression : A3
 Projection : RGF93 EPSG 2154



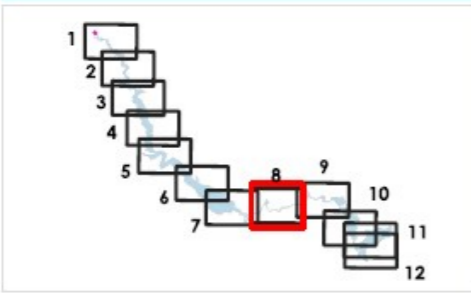






Onde de rupture du barrage de Sainte Cécile d'Andorge

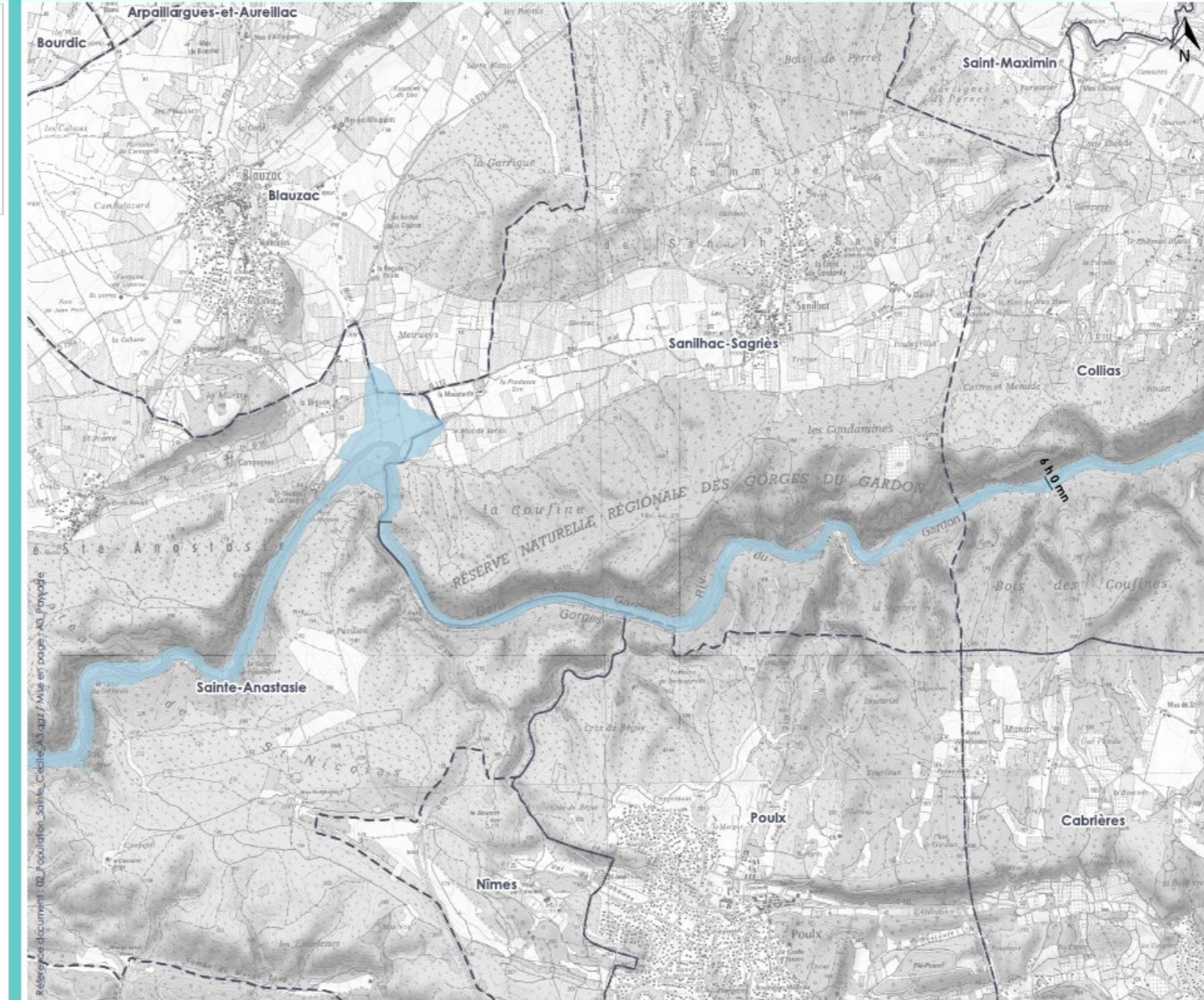
Population selon les carreaux INSEE Carte N°8

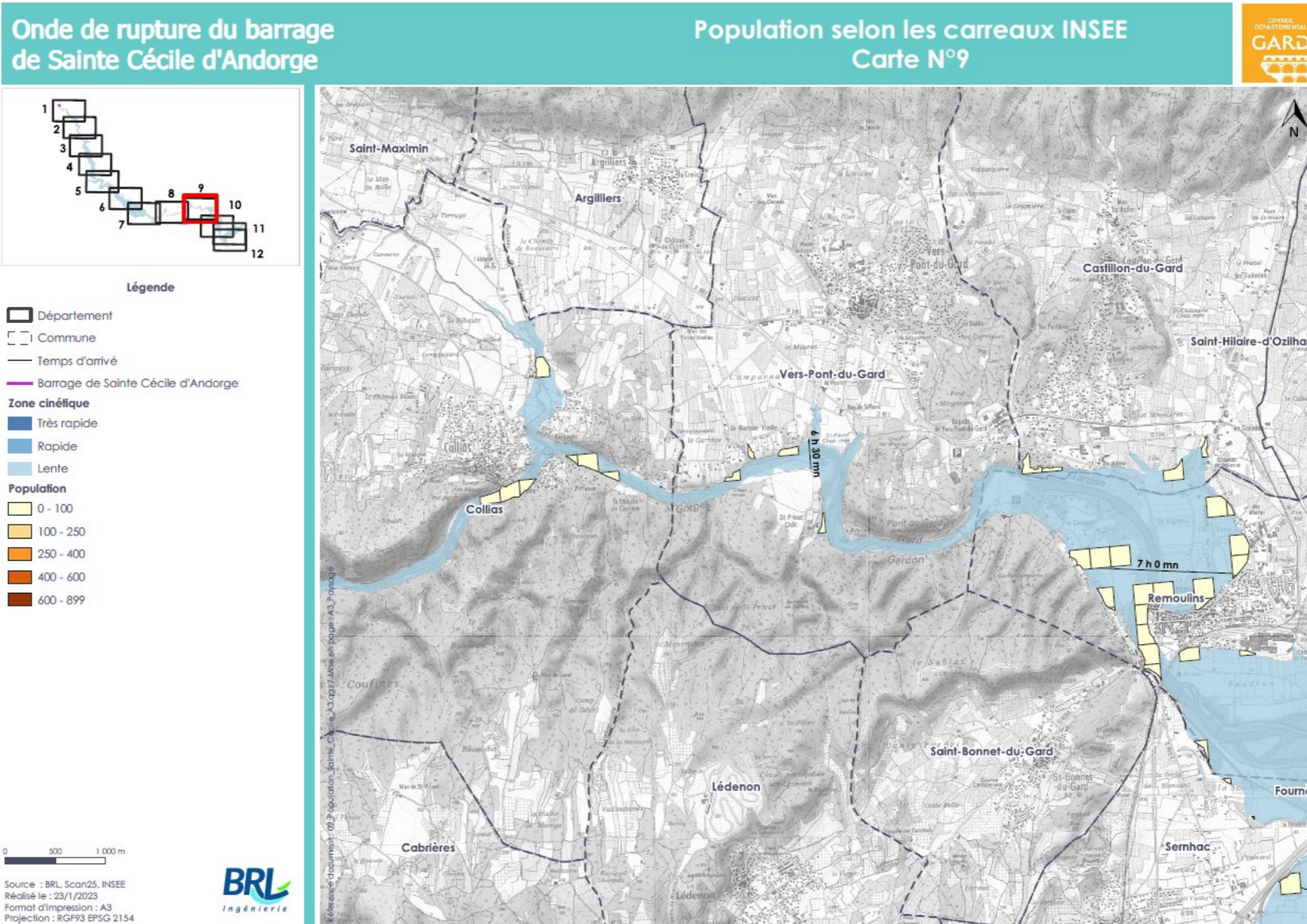


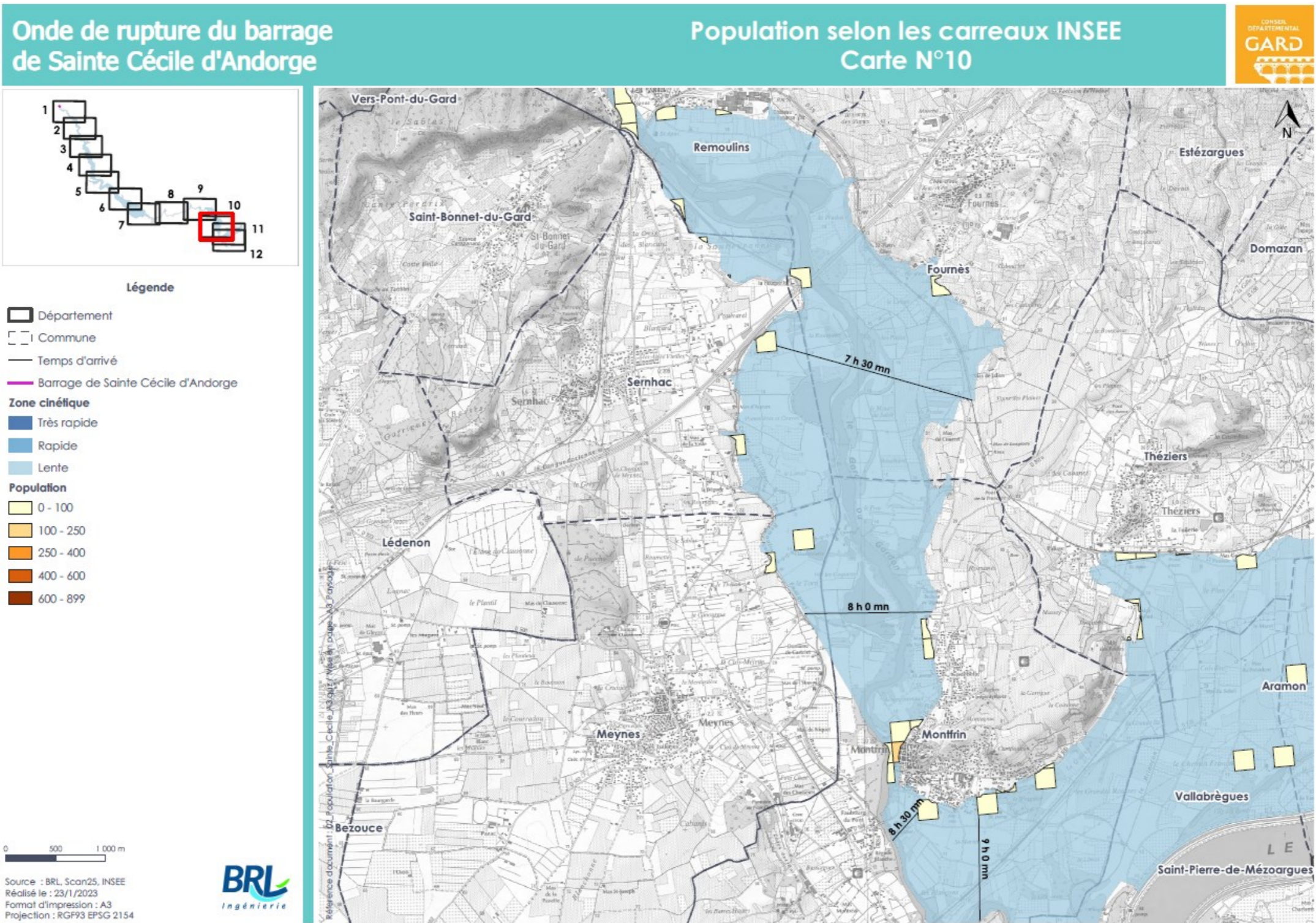
- Légende**
- Département
 - Commune
 - Temps d'arrivé
 - Barrage de Sainte Cécile d'Andorge
 - Zone cinétique**
 - Très rapide
 - Rapide
 - Lente
 - Population**
 - 0 - 100
 - 100 - 250
 - 250 - 400
 - 400 - 600
 - 600 - 899

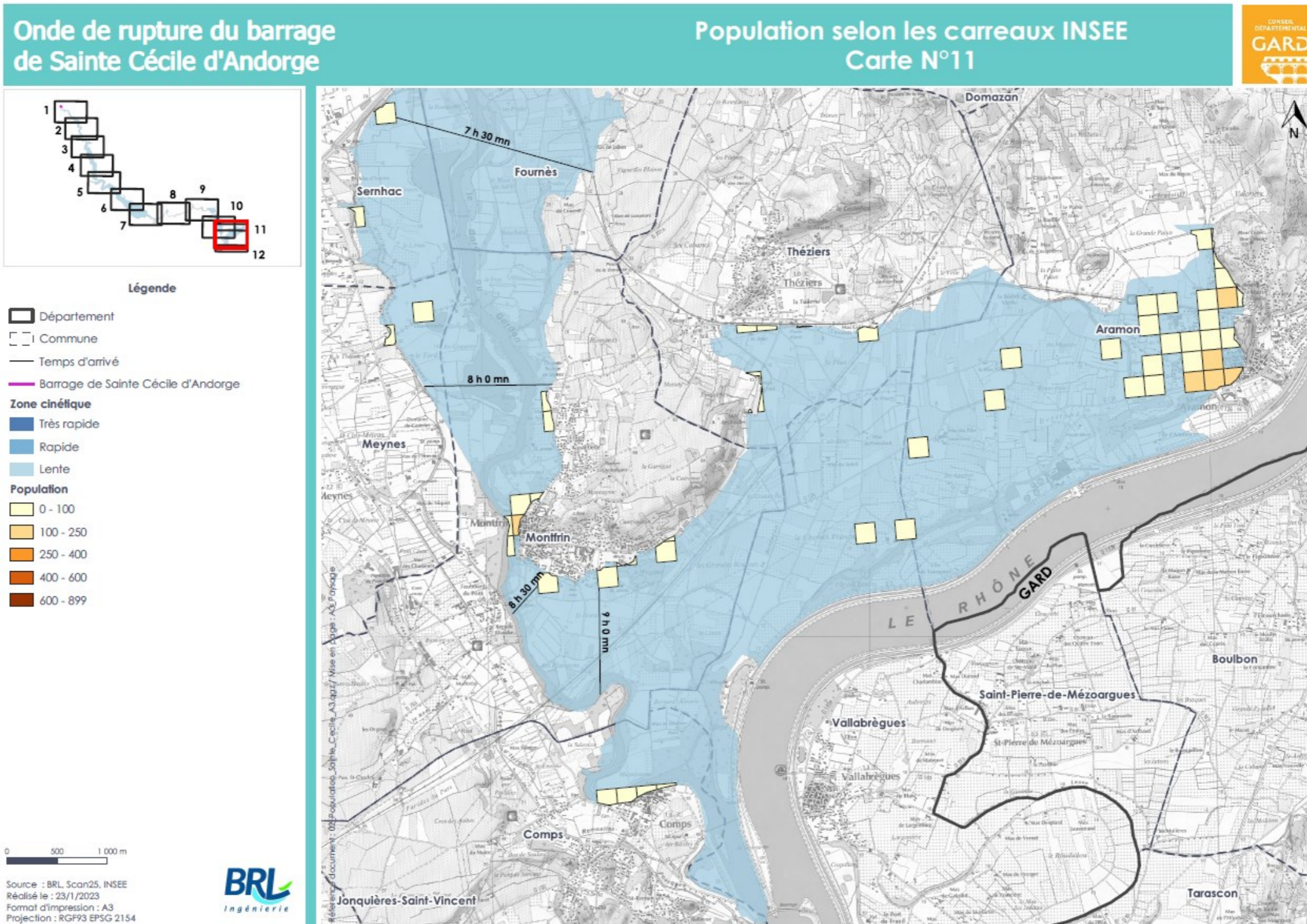
0 500 1 000 m

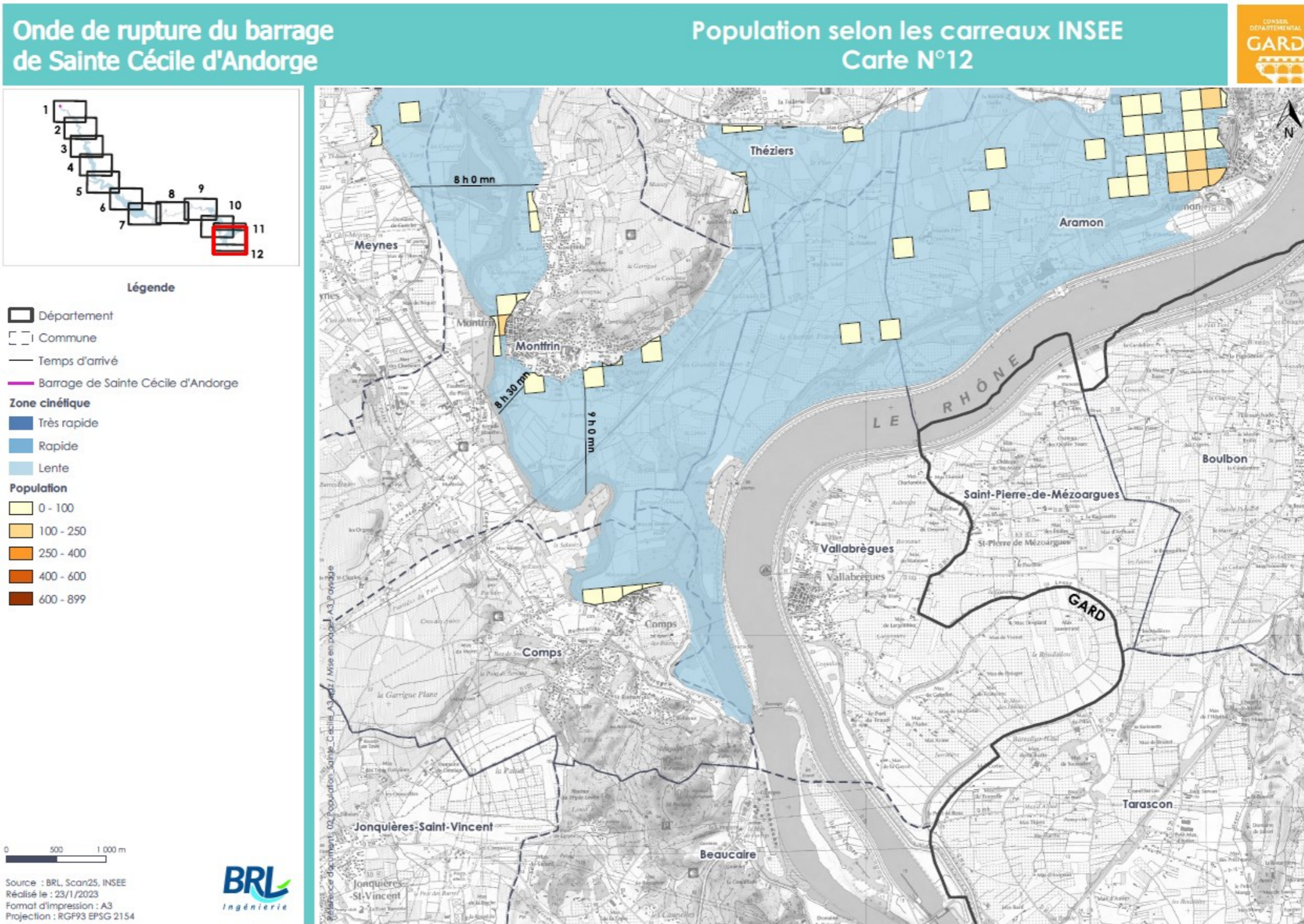
Source : BRL Scan25, INSEE
 Réalisé le : 23/1/2023
 Format d'impression : A3
 Projection : RGF93 EPSG 2154











ANNEXE 1 DESCRIPTION DES ELEMENTS EXISTANTS

11 ELEMENT BE3 : MASQUE BITUMINEUX

11.1 CARACTERISTIQUES DIMENSIONNELLES DU MASQUE

Les caractéristiques dimensionnelles du masque sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 11-1 : Caractéristiques dimensionnelles du masque

Caractéristiques	
Surface totale	6 800 m ²
Fruit du masque	1,7H/1V
Longueur de raccordement sur le couronnement	152 m
Longueur de raccordement à plinthe et à la galerie périmétrale	210 m

11.2 MASQUE EN SECTION COURANTE

La figure suivante présente les couches constituant le masque originel mis en œuvre en 1967 et le masque rénové en 1995.

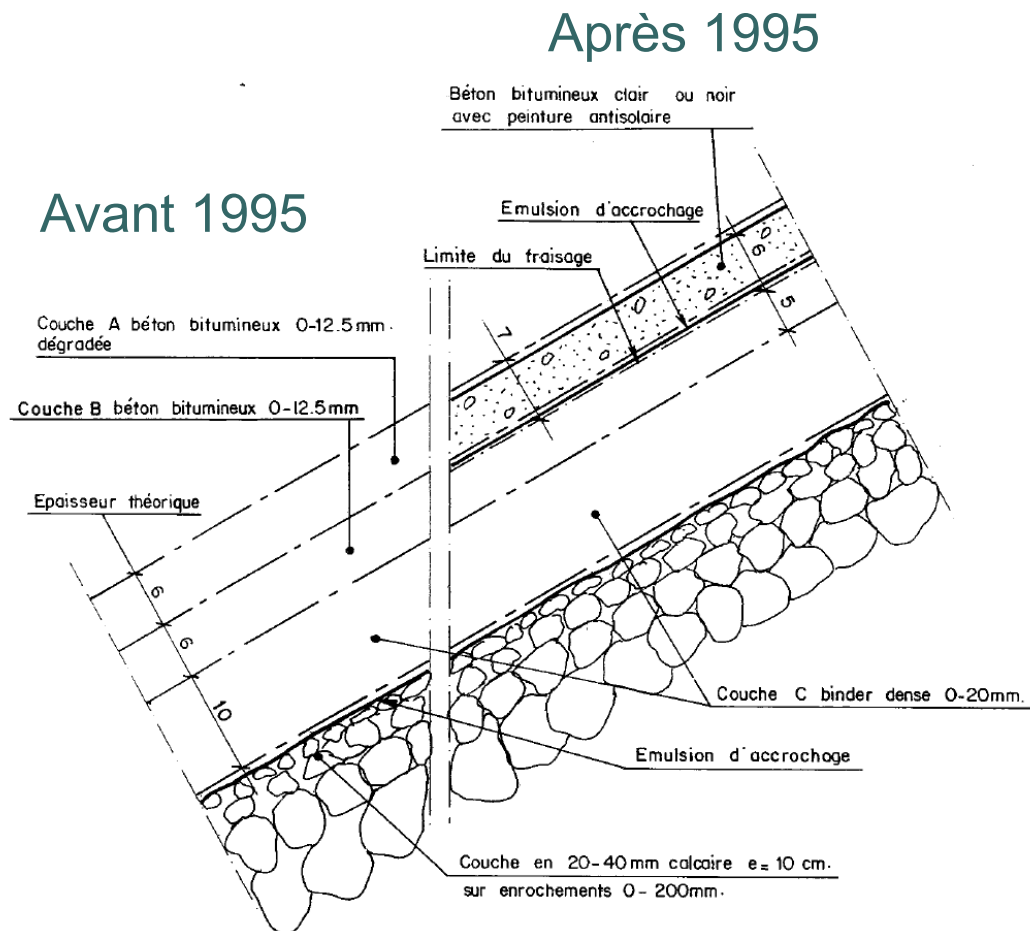


Figure 11-1 : Coupe-type de l'ancien masque et des travaux de rénovation effectués en 1995

Le masque bitumineux originel était constitué de 3 couches, de l'intérieur vers la surface :

- la couche C de béton bitumineux support⁹ de 10 cm d'épaisseur (enrobés 0/20 mm au dosage de 7,8 % de bitume),
- les deux couches A et B de béton bitumineux étanche de 6 cm d'épaisseur chacune (enrobés 0/12 mm au dosage de 8 % de bitume),
- un enduit de bitume et filler sur 3 mm d'épaisseur recouvert par 2 couches de peinture blanche en protection thermique entre la cote de retenue normale et la crête.

Ces couches reposaient sur, de l'intérieur vers la surface :

- une couche de 2 m d'épaisseur de petits enrochements drainants (granulométrie 5-200 mm) assurant la transition avec les enrochements du barrage,
- une couche de transition en matériaux concassés 20/40 mm sur une épaisseur 10 cm constituant le support d'accroche du masque, imprégné par un cut-back.

⁹ Dans certains documents antérieurs, notamment l'EDD du barrage, la couche C a été qualifiée de couche drainante ce qui n'est pas compatible avec ses caractéristiques. On retiendra dorénavant l'appellation « couche support ».

La couche support assurait une transition entre la couche d'étanchéité et le remblai, et permettait de s'affranchir des irrégularités de la surface des remblais. Elle devait avoir suffisamment de vides pour libérer la vapeur d'eau emprisonnée lors de la mise en place de la couche d'étanchéité et lui assurer une bonne liaison en évitant la formation de cloques dans les parties hors d'eau (environ 80% de la hauteur du barrage hors crue). Sa perméabilité devait permettre de limiter les écoulements dans le corps du remblai tout en assurant une augmentation de la perméabilité en allant de l'amont vers l'aval du barrage.

A la suite des dégradations du masque dues aux effets thermiques sur le parement, la couche supérieure A de 6 cm de béton bitumineux étanche a été remplacée en 1995 avec un enrobé de teinte claire. Cette teinte claire devait permettre une réduction de température au cœur de la couche de 5 à 10 °C en comparaison avec un bitume classique noir. Le graphique suivant présente les dispositions prévues pour l'ancien masque et pour le masque rénové et au droit des joints séparant les bandes verticales.

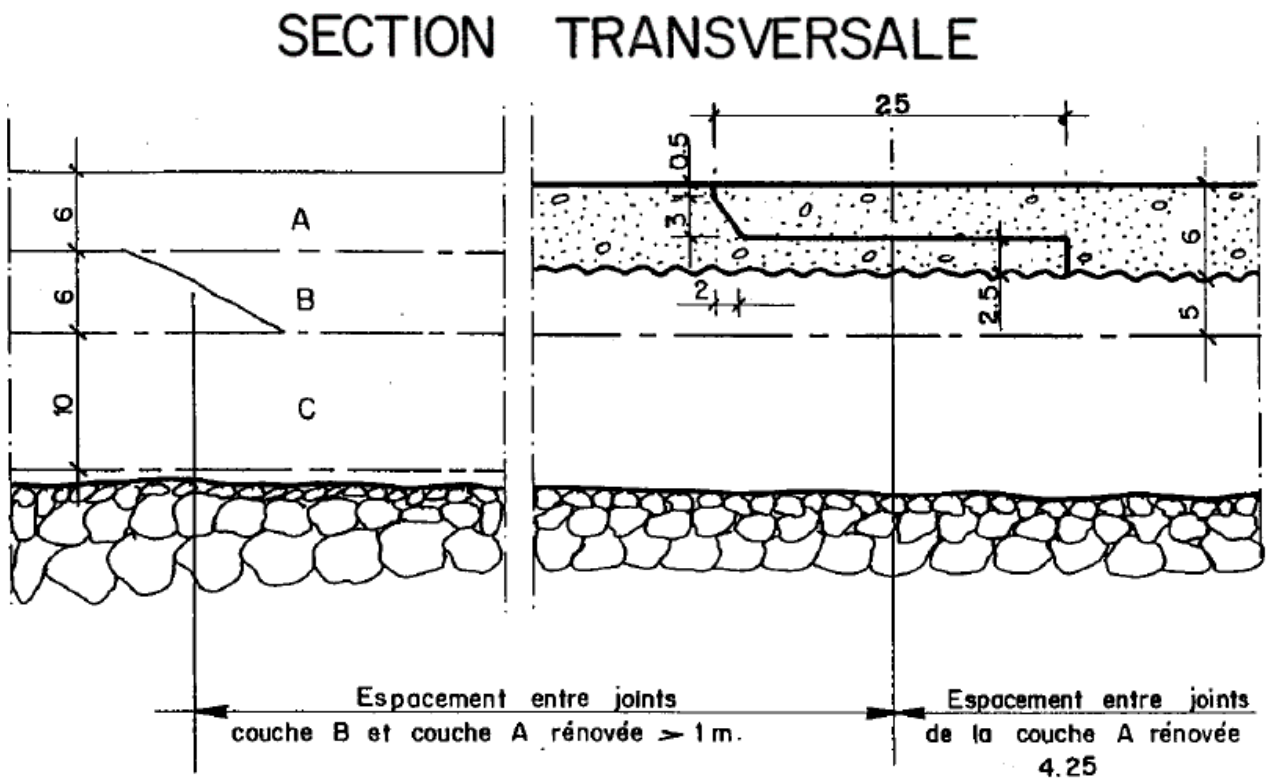


Figure 11-2 : traitement entre les bandes (ancien masque à gauche et masque rénové à droite)

La rénovation du masque a été réalisée par bandes de 4,25 m de largeur. Les joints entre le nouveau et l'ancien masque sont décalés d'au moins un mètre.

11.3 RACCORDEMENT A LA PLINTHE

La figure suivante présente le raccordement à la plinthe.

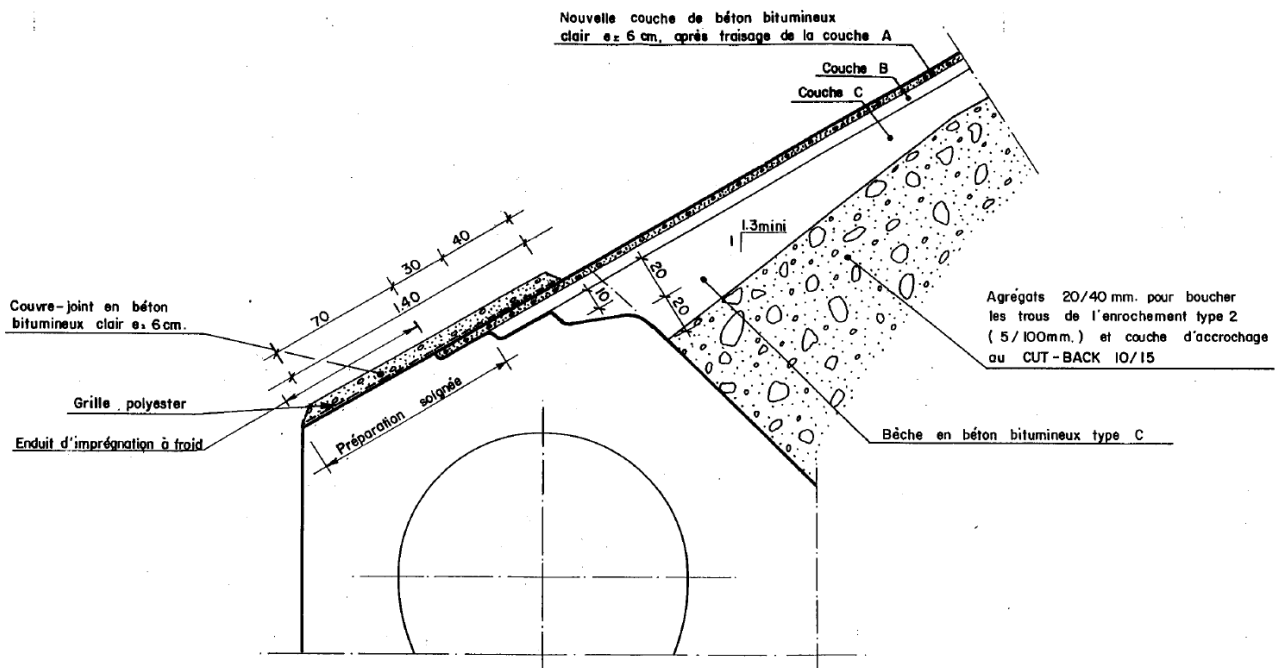


Figure 11-3 : raccordement du masque à la plinthe

En périphérie du masque, au raccordement de la plinthe, un couvre joint en béton bitumineux supplémentaire a été mis en œuvre sur une épaisseur de 6 cm selon les plans (un peu plus selon les observations). Il est identique à celui employé pour la rénovation du masque mais comprend un renforcement par une grille en polyester. Sur les parties en béton, un enduit d'imprégnation à froid a été mise en œuvre.

11.4 RACCORDEMENT AU PARAPET

Le couronnement, d'une largeur de 6 m, supporte une piste de service bordée de glissières de sécurité à l'aval et d'un muret anti-vague (ou parapet) à l'amont.

Le muret parapet a également été réalisé lors de la réfection du masque en 1995. Il est fondé sur une grave bitume soigneusement compactée (environ 0,3 m d'épaisseur selon la coupe ci-dessous). Le relevé d'étanchéité a été réalisé en insérant la nouvelle couche de béton bitumineux entre le muret en béton et sa fondation en grave bitume.

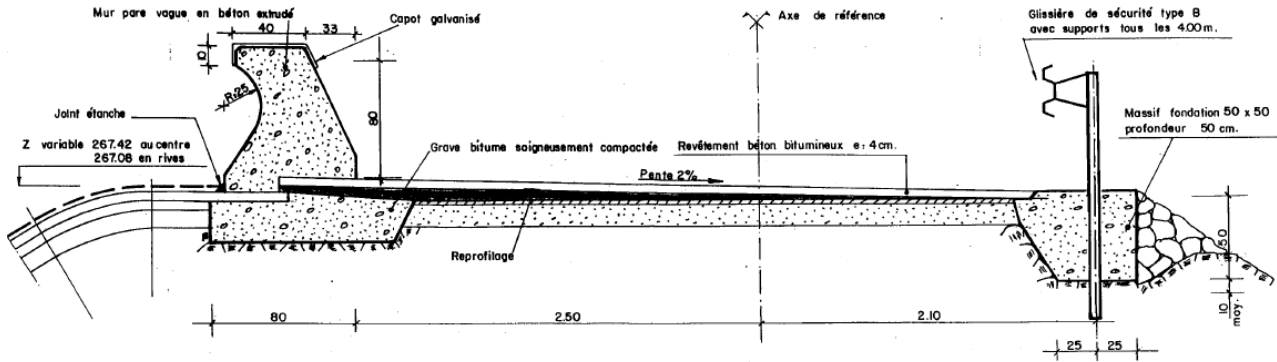


Figure 11-4 : réfection de la crête

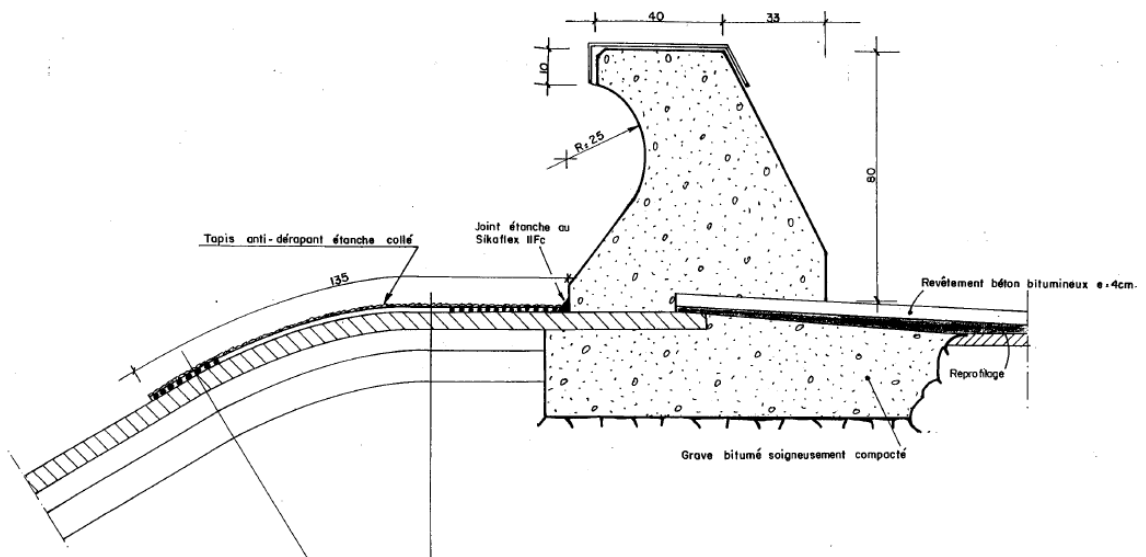


Figure 11-5 : détail du mur anti-vague

11.5 SYNTHÈSE DU DIAGNOSTIC DU MASQUE

Les essais réalisés en 2020 montrent que la perméabilité de la couche A est satisfaisante dans les zones non endommagées. Toutefois :

- Pour la couche d'étanchéité A, une partie des désordres relevés lors des inspections visuelles et à l'analyse des carottes (fissures profondes voire traversantes, épaufrures causées par les dents de pelle mécanique, granulats anormalement grands, granulats de qualité mécanique insuffisante) constituent des points faibles de l'étanchéité du masque ; ces défauts sont nombreux et affectent une surface importante de la couche ;
- La barrière d'étanchéité supplémentaire constituée par la couche B, aujourd'hui âgée de plus de 55 ans, est peu fiable :
 - ◆ le rabotage réalisé à l'occasion de la rénovation de la couche A a parfois réduit son épaisseur (2 carottes avec une épaisseur de 1 à 3 cm, 6 avec moins de 4 cm) ;
 - ◆ la compacité de la couche est notablement inférieure à ce qui est recommandé pour une couche étanche (près de la moitié des % de vides > 4 %) ;
 - ◆ le bitume a durci avec le temps, ce qui le rend cassant et pourrait conduire à l'apparition de fissures en cas de déformation du fait d'une mise en charge importante du masque.
- A l'interface entre les deux couches, les essais démontrent un décollement avéré sur une partie importante du masque bien corrélé avec les déplacements des cibles sur le parement ; ce décollement (perte d'adhérence de la couche / fluage / fissuration) a un potentiel d'auto-entretien voire d'auto-accélération ; ce mécanisme de dégradation sera d'autant plus rapide que les défauts d'étanchéité s'aggraveront.
- Des doutes subsistent sur la perméabilité de la couche A en partie inférieure de masque, (notamment sur les triangles en rive où le réglage et le compactage ont été moins efficace car effectués manuellement), et des joints entre bandes, potentielles zones de faiblesse.

La couche support C (que l'on ne qualifiera pas de drainante, contrairement à ce qu'on retrouve dans la bibliographie du barrage) offre probablement un complément d'étanchéité.

De nombreuses cloques et décollements, observés dès 1972, entre l'ancienne couche A et la couche B et dès 1995 entre la nouvelle couche A et la couche B, sont en partie imputables à la superposition de couches étanches, solution constructive retenue en 1966 car on ne disposait pas d'équipements et de moyens à l'époque permettant de s'en affranchir et lors des travaux de réfection de 1995 (on disposait d'équipements permettant de s'en affranchir mais par contre on avait déjà perdu une grande partie du savoir-faire des entreprises et de leurs personnels par manque de travaux de ce type depuis la fin des années 1970).

En conclusion, on retiendra que :

- l'étanchéité du masque du barrage de Ste-Cécile d'Andorge n'est pas au niveau attendu par comparaison aux standards actuels et du fait de son état ;
- les dégradations par décollement/fluage vont s'accroître et conduiront probablement à devoir le reprendre dans moins de 20 ans.

Ce constat est aggravé par le fait que cette étanchéité ne peut véritablement être éprouvée (ce qui est essentiel avec ce type de technique) :

- S'agissant d'un barrage écrêteur, sa performance peut difficilement être mesurée par une mise en eau contrôlée (cf. document annexe n°6 du dossier de révision spéciale relatif à la faisabilité d'une mise en eau contrôlée) ;
- Les débits de fuite du masque ne sont pas collectés dans la plinthe mais se perdent de manière diffuse dans le corps du barrage ce qui ne permet pas un véritable suivi.

Enfin, le remplissage significatif le plus récent¹⁰ du barrage (2008) n'a représenté que 55% de la charge maximale sous les PHE (actuelles et futures). Il est possible qu'un remplissage important conduise à des cisaillements et des écoulements entre les couches A et B susceptibles d'accentuer les désordres.

12 ELEMENT BE4 : PLINTHE

Le schéma suivant présente la localisation de la plinthe en pied amont du barrage et un détail de la plinthe.

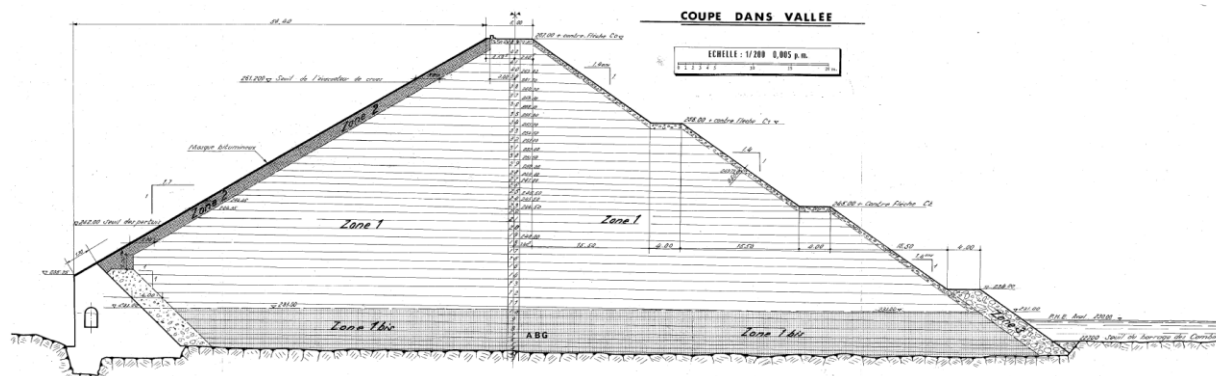


Figure 12-1 : plinthe Be4

La plinthe est un ouvrage en béton armé qui intègre une galerie périmétrale de visite. En fond de vallée, la cote d'arase de la plinthe est 235,35 m NGF pour une cote de fondation minimale d'environ 225 m NGF (soit une hauteur maximale sur fondation de l'ordre de 10 m).

Un voile d'étanchéité (Be7) a été réalisé sous le pied amont de la plinthe (cf. §3.5.3).

Le voile de drainage (Be8) a été réalisé depuis l'intérieur de la plinthe (cf. § 3.5.4). La galerie comprend un puisard avec une pompe d'exhaure

Par ailleurs, des forages de collage ont été exécutés entre les forages d'injection (et dans le même plan) le long de la plinthe et de la tête amont de la galerie. Les profondeurs de ces forages ont été ajustées de manière à atteindre une profondeur de 3 à 5 m sous le niveau des fouilles. Ils ont été injectés avec une pression de 3 à 5 bars.

Le masque (Be3) vient se refermer sur la plinthe. La plinthe assure donc le raccordement de l'étanchéité entre le masque et la fondation. A noter, lors de la construction du barrage, elle a également servi de batardeau pour la dérivation provisoire des crues dans les galeries d'évacuation des crues.

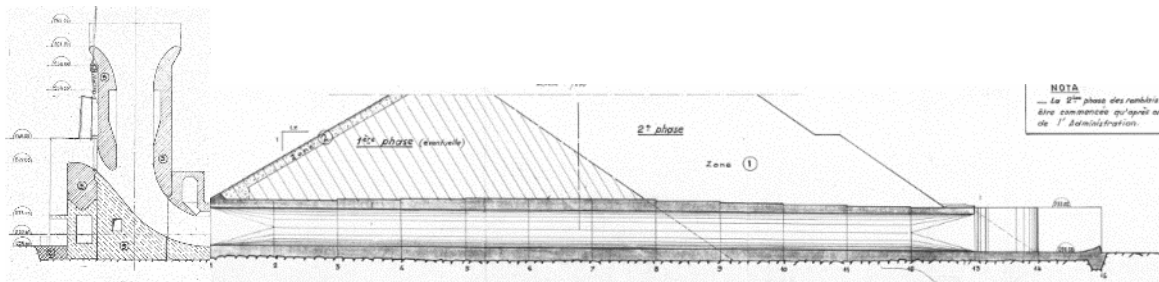
¹⁰ On écarte ici le remplissage maximal atteint en 1977 avec un masque de moins de 10 ans.

13 ELEMENTS BE10 : EVACUATEUR DE CRUE

13.1 PRESENTATION GENERALE

L'évacuateur de crues est constitué de 2 pertuis écrêteurs de demi-fond et d'une double tulipe en partie supérieure qui se rejettent dans deux galeries sous remblais. Le schéma ci-dessous présente une vision d'ensemble de l'ouvrage :

Figure 13-1 : Coupe longitudinale de la tour de prise et de la galerie de fuite



La base de la tulipe accueille également :

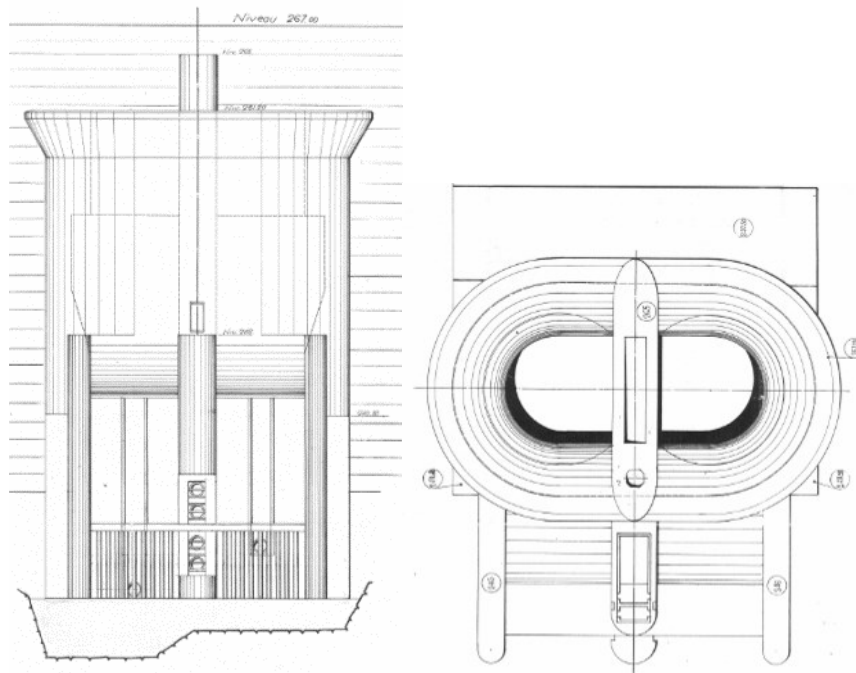
- Le dispositif de restitution, composé de 4 prises étagées qui se rejoignent dans une conduite unique noyée dans le radier de la galerie et dont l'exutoire est situé en pied aval du barrage (à gauche du bajoyer droit de la sortie des galeries sous remblai) ;
- Le dispositif de vidange, composé de deux conduites qui débouchent dans les galeries sous remblai de l'évacuateur, en aval immédiat des pertuis.

Une plateforme, située à 246 m NGF coté amont, permet la mise en place des batardeaux des deux dispositifs. Elle est accessible depuis les galeries du barrage.

La tour comprend un reniflard permettant l'aération de la lame d'eau en aval immédiat de la section de contrôle des pertuis. L'accès au sommet de la tulipe est permis par un trou d'homme.

Concernant le reniflard, celui-ci avait une arase initiale de 265 m NGF et était donc à une cote inférieure à la cote des PHE (266,80 m NGF) et à la crête du barrage. En mars 2009, une rehausse métallique a été mise en place au droit du reniflard afin d'assurer l'aération à l'aval de la section de contrôle de la galerie de fuite pour toute hauteur de plan d'eau. La pièce métallique permet désormais une aération à l'aval de la section de contrôle jusqu'à 268 m NGF, soit 0,7m environ au-dessus de la cote de la crête du barrage.

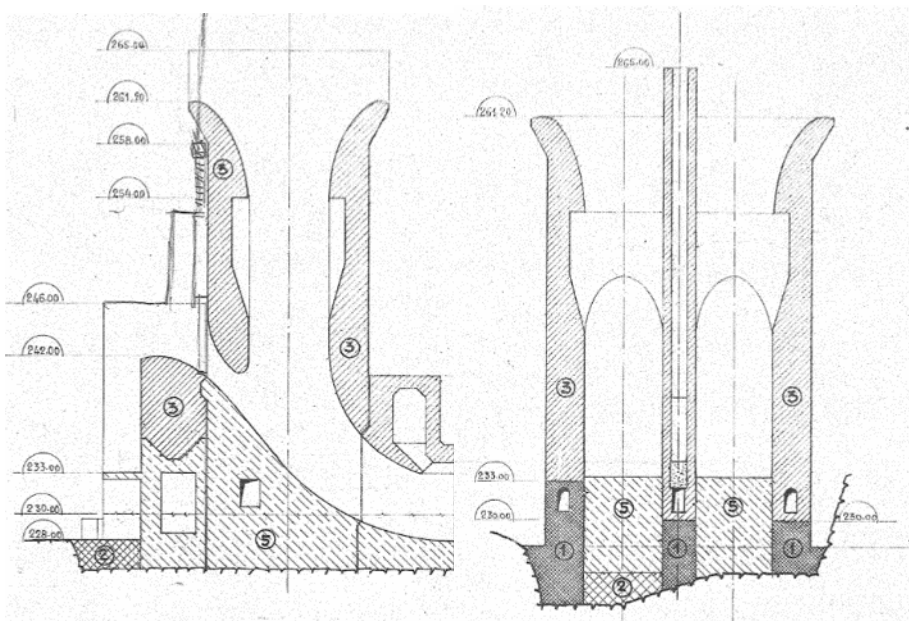
Figure 13-2 : Vue amont et de dessus de la tulipe (avant rehausse du reniflard)



13.2 TULIPE

A partir de la cote 261,34 m NGF, la tulipe entre en service, avec un débit d'abord contrôlé par une loi de seuil à surface libre, puis par une loi d'écoulement en charge, la transition se faisant à la cote 266 m NGF environ. Au-delà de 264,30 m NGF environ, la section de contrôle se situe en entrée des galeries de fuite.

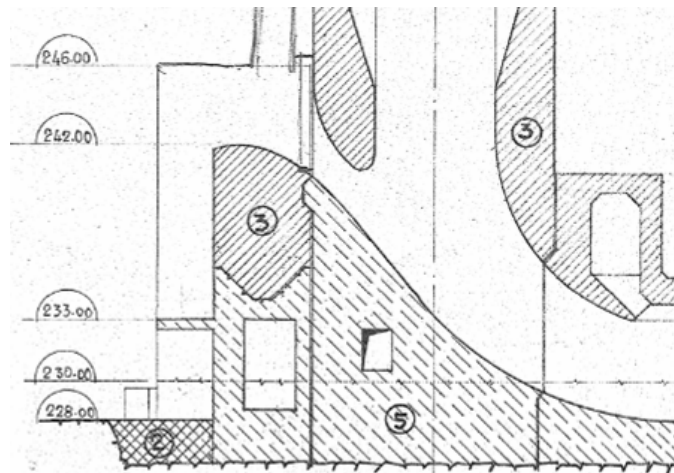
Figure 3-10 : Coupes longitudinale et latérale de la tulipe



13.3 PERTUIS DE DEMI-FOND

Les 2 pertuis de demi-fond, calés à la cote 242 m NGF, de section unitaire 6m x 1,5m, assurent, en débit et en fréquence, l'essentiel de la fonction d'évacuation des crues. En fonction de la montée du plan d'eau au-delà de la cote 242 m NGF, le débit évacué en aval est d'abord contrôlé par les pertuis. Ces pertuis fonctionnent dans un premier temps selon une loi de seuil à surface libre puis, après ennoisement de leur section de contrôle, ils se mettent en charge, la transition s'effectuant à 245,60 m NGF environ.

Figure 13-3 : Coupe longitudinale des pertuis



13.4 GALERIES SOUS REMBLAI

Les 2 galeries sous remblai permettent l'évacuation des débits en provenance des pertuis et de la corolle. Les galeries sont en béton armé avec les caractéristiques suivantes : 6 m de diamètre intérieur, longueur de 120 m, pente de 1%, calage entre les cotes 227,86 (entrée) et 226,66 m NGF (sortie). L'aération en amont de la galerie est assurée par le reniflard débouchant en sommet de tour.

Un saut de ski a été aménagé en sortie des galeries.

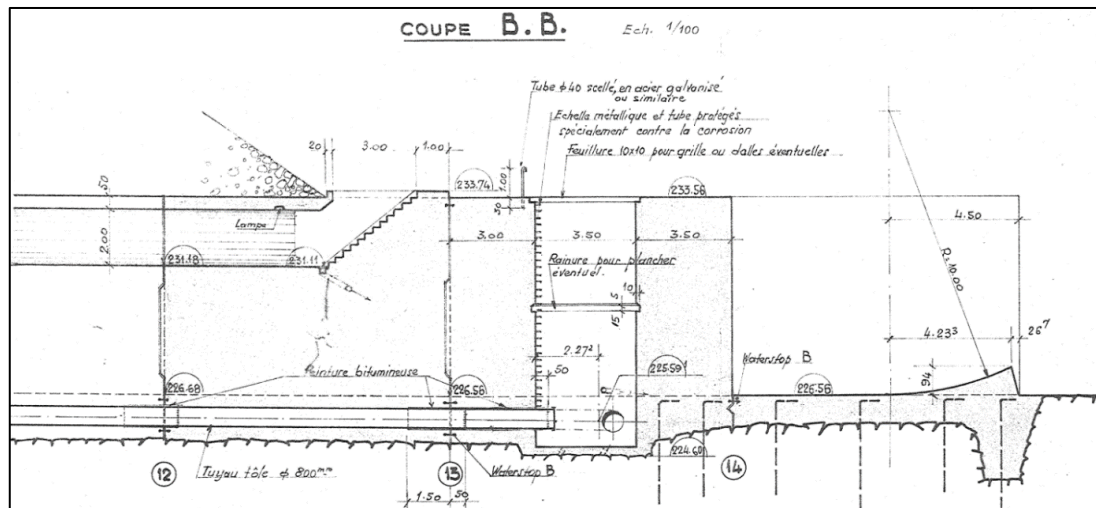


Figure 13-4 : saut de ski

La bathymétrie permet de constater la présence d'une fosse dans le prolongement de la galerie. Le fond de la fosse est situé entre 10 et 25 m en aval de l'extrémité de la galerie. Sur cette distance, la cote de la fosse est comprise entre 222,5 et 223,0 m NGF. Cette cote correspond à la cote du rocher sain selon les investigations géotechniques. Elle est à comparer aux cotes :

- de la sortie de la galerie : 227,5 m NGF (5 m plus haut),
- de la fondation de la bèche à l'extrémité de la galerie : environ 225,5 m NGF (3 m plus haut),
- du fond du lit dans la fosse avant construction du barrage : environ 227,0 m NGF (4,5 m plus haut) sur le plan des fouilles du barrage, cette zone n'ayant pas été excavée dans le cadre des fouilles).

Les talus de la fosse en aval de la galerie présentent des pentes de l'ordre de 2H/1V. Cette fosse s'est formée en une cinquantaine d'années.