



UNIVERSITÉ
CAEN
NORMANDIE



Le régime thermique des rivières de Normandie

Appui des statistiques au diagnostic de
l'influence des eaux souterraines
sur la température des cours d'eau

Le cas de la Touques et de l'Orne

Séminaire statistique organisé par le
Laboratoire de Mathématiques Nicolas Oresme

Bruno Dardaillon
Frédéric Gresselin

Le 25 septembre 2020

DREAL Normandie
LMNO
M2C


PRÉFET
DE LA REGION
NORMANDIE

Liberté
Égalité
Fraternité

DREAL de Normandie SMCAP

Sommaire de la présentation

I. Introduction

II. Caractéristiques du territoire étudié et le réseau de suivi thermique

III. Outils et résultats statistiques

- Corrélation entre la température de l'eau et de l'air
- L'analyse en composante indépendante
 - sur chroniques T_w brutes
 - sur chroniques des différences $T_w - T_a$
- L'analyse en composante principale

IV. Incidence respective des eaux issus du ruissellement et de la nappe dans la thermie de la Touques

V. Conclusions et perspectives

La température : un paramètre clef des écosystèmes aquatiques

Les poissons sont poïkilothermes (ne régulent pas leur température interne)

La température joue sur leur nutrition, leur digestion, leur croissance, leur reproduction, sur le développement des larves et des embryons

Ils ont une certaine souplesse thermique mais les chocs thermiques leur sont fatals

Ils doivent se déplacer vers des refuges thermiques en cas de stress

La concentration en oxygène dissous diminue quand la température augmente

L'oxygène dissous est indispensable à la respiration des poissons

Il intervient dans les réactions de décomposition de la matière organique et la disponibilité en nutriments dans le cours d'eau

La température et la faible concentration en oxygène dissous favorisent la prolifération de micro-algues. Celles-ci entraînent des dysfonctionnements biologiques



Pourquoi les eaux souterraines peuvent influencer la température d'un cours d'eau ?

- Elles surgissent d'un milieu confiné, peu influencé par la température de l'air ;
- Leur température est fraîche et varie peu ;
- Les apports en eau souterraine soutiennent le débit du cours d'eau en été ;
- Les rivières fortement influencées par les eaux souterraines ont une biodiversité très différente des rivières non influencées ;
- Connaître l'influence des eaux souterraines dans le cadre du changement climatique ;

Sommaire de la présentation

I. Introduction

II. Caractéristiques du territoire étudié et le réseau de suivi thermique

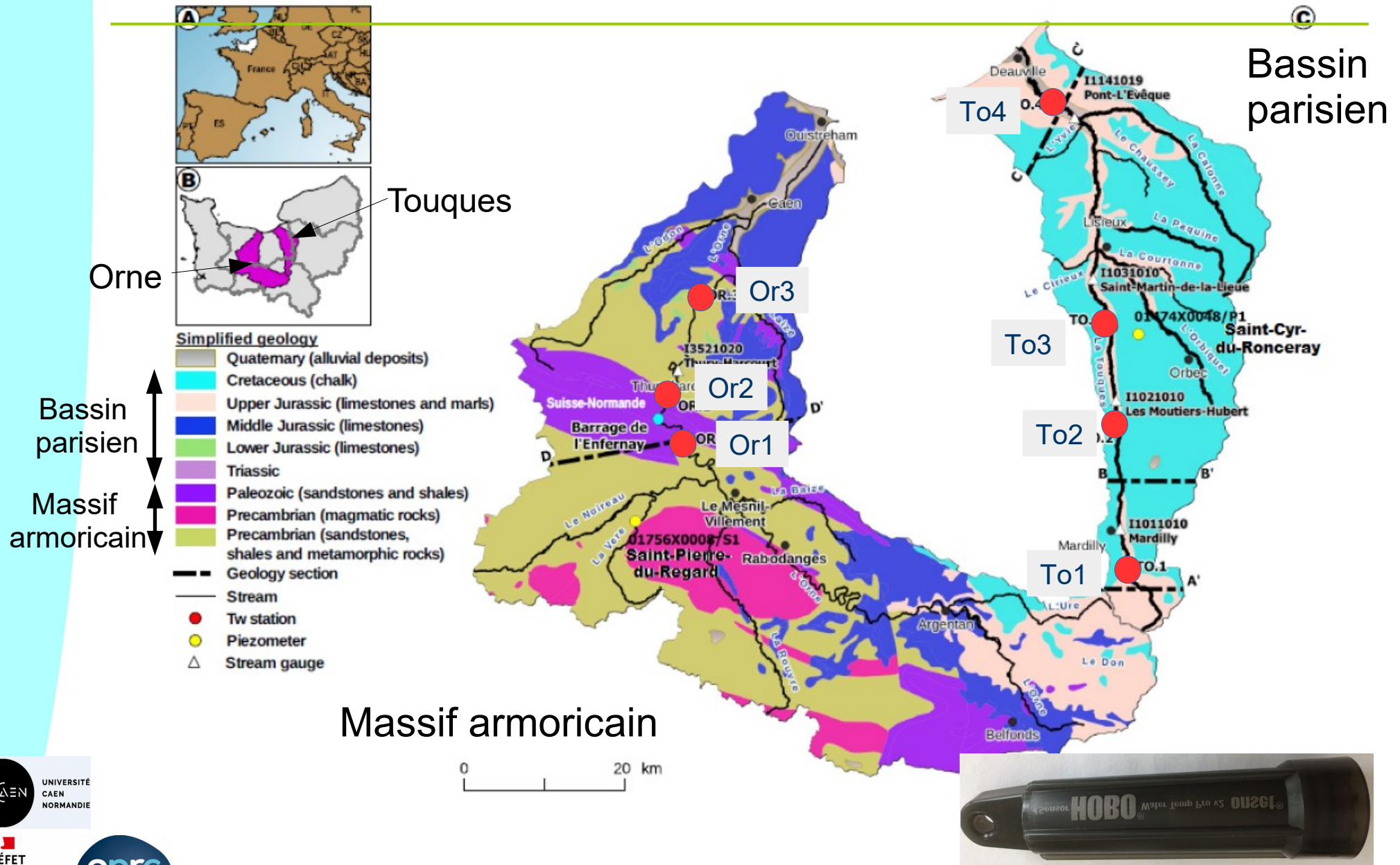
III. Outils et résultats statistiques

- Corrélation entre la température de l'eau et de l'air
- L'analyse en composante indépendante
 - sur chroniques T_w brutes
 - sur chroniques des différences $T_w - T_a$
- L'analyse en composante principale

IV. Incidence respective des eaux issus du ruissellement et de la nappe dans la thermie de la Touques

V. Conclusions et perspectives

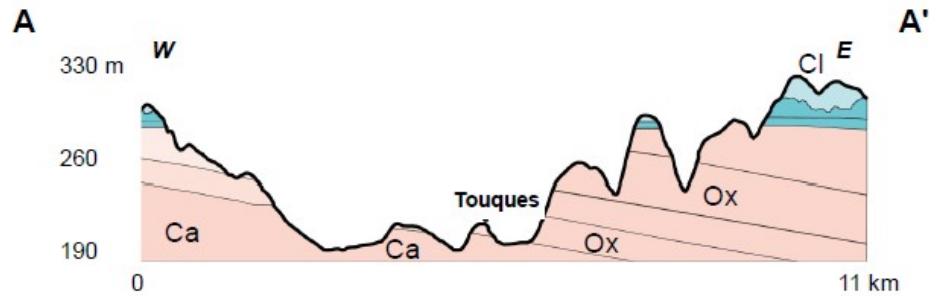
Géologie du territoire d'étude et implantation des stations de mesure



sonde de mesure

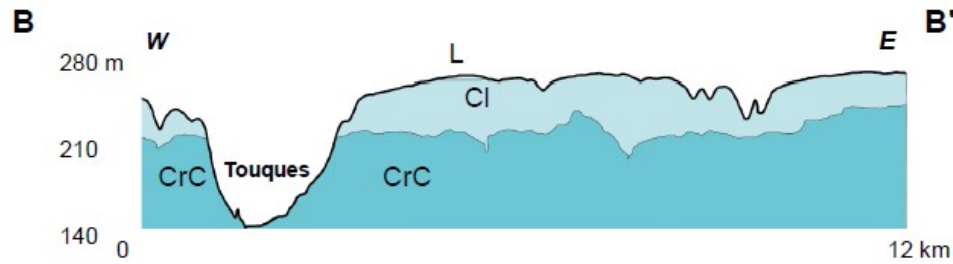
Coupes géologiques synthétiques comparatives entre les deux bassins versants

Touques amont



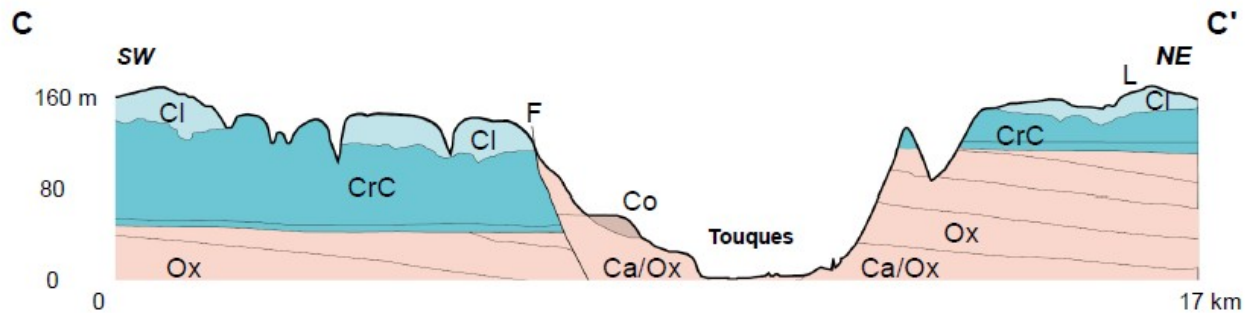
amont de To1

Touques moyenne



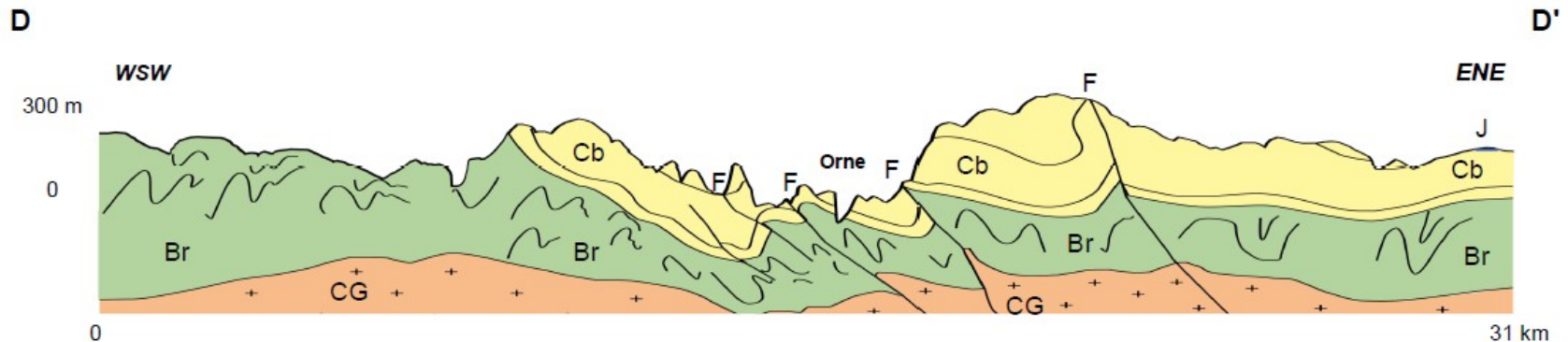
To2 et To3

Touques aval

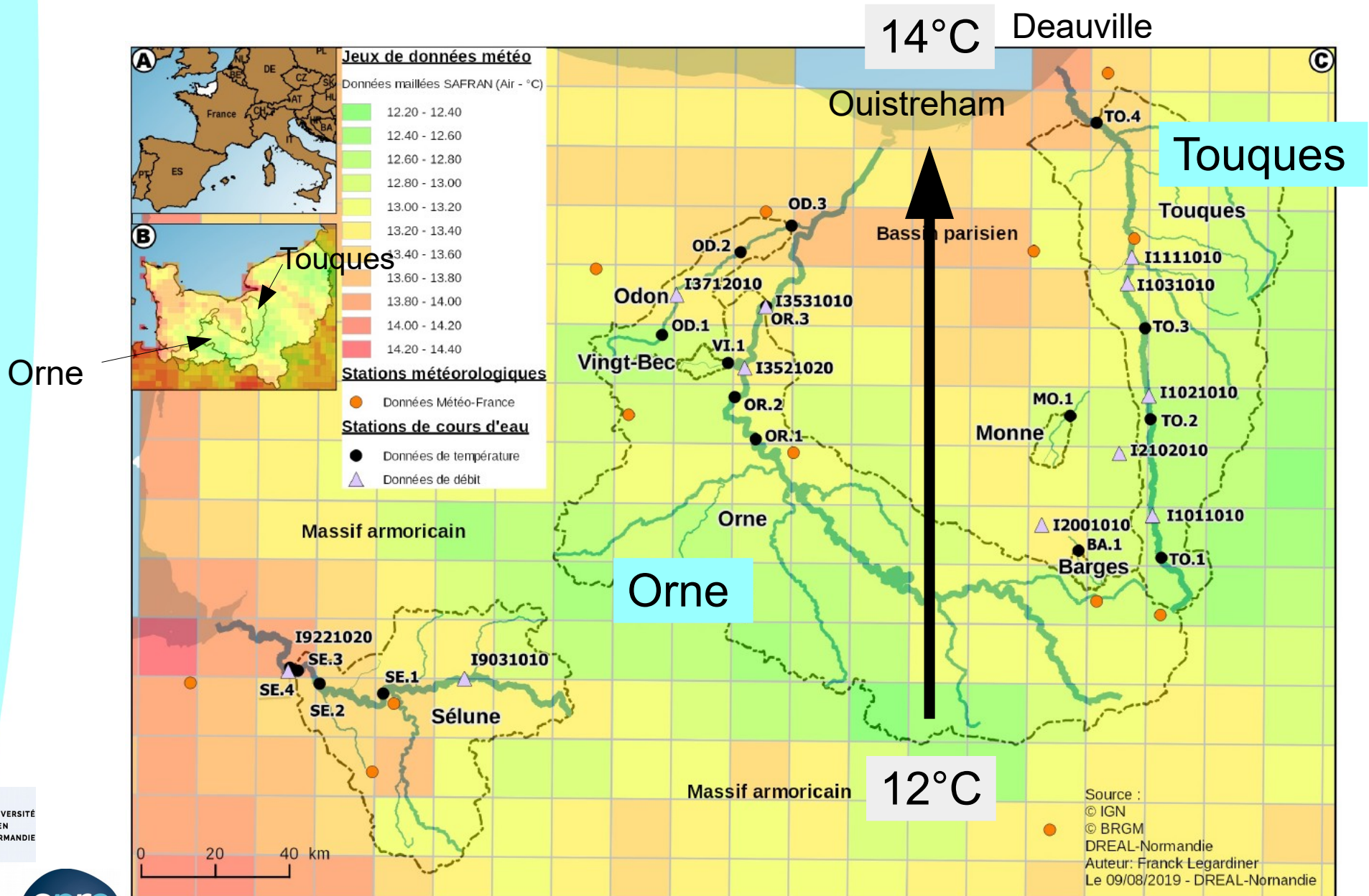


aval de To4

Orne



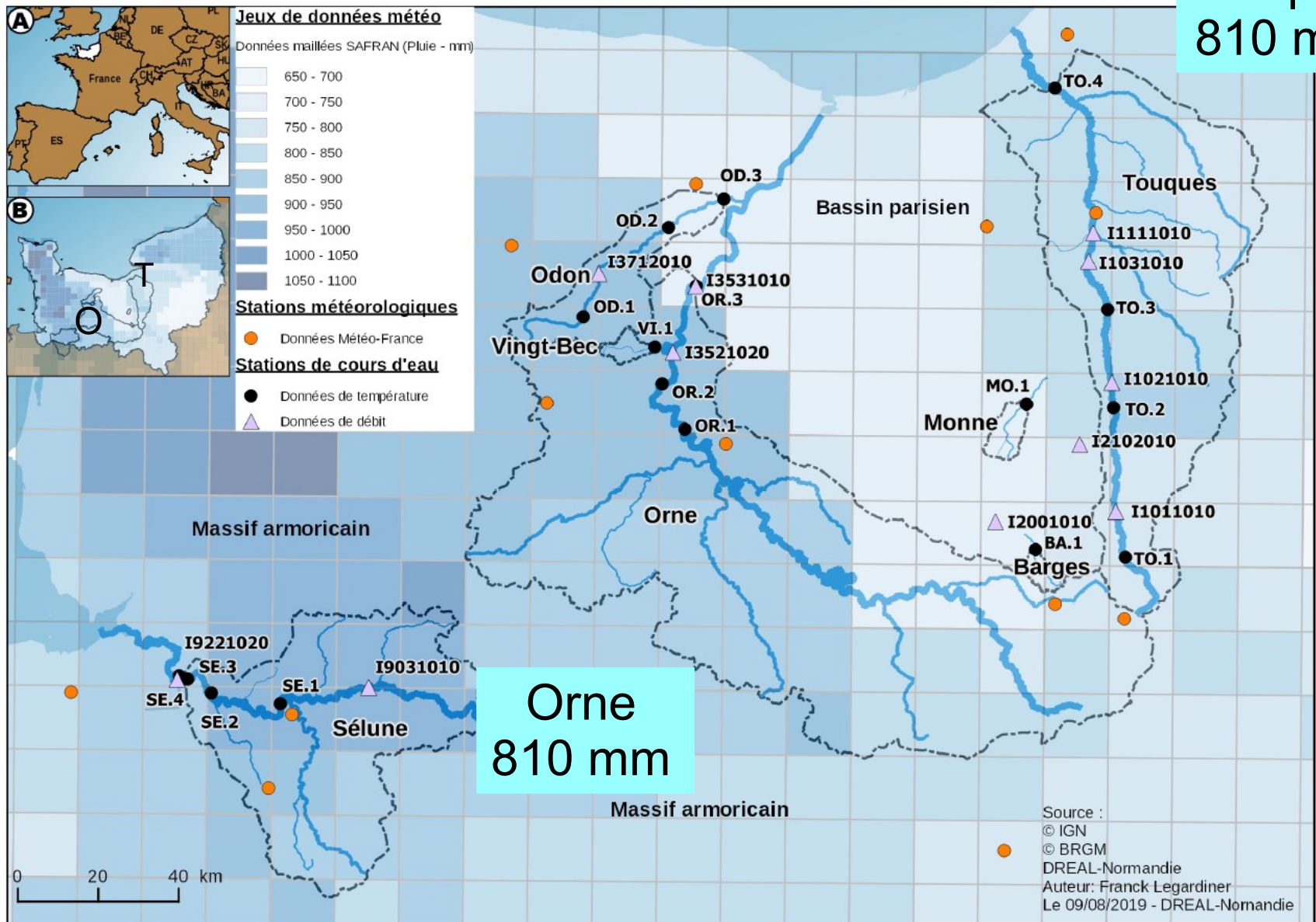
Orne et Touques, deux bassins versants de climat comparable : température atmosphérique moyenne annuelle



source : safran météo-France

Orne et Touques, deux bassins versants de climat comparable : pluviométrie moyenne annuelle

Touques
810 mm



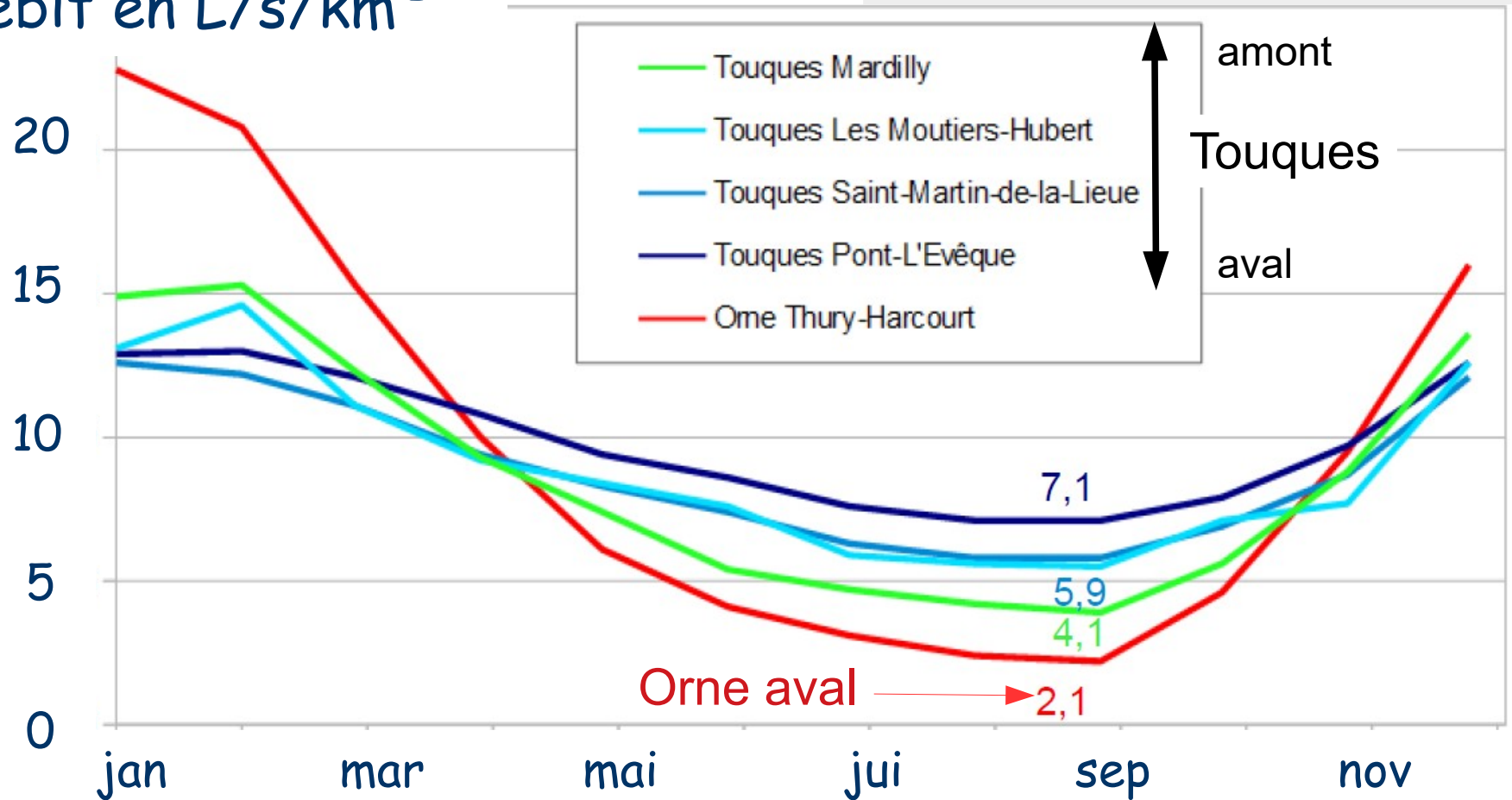
Orne
810 mm

source : safran météo-France

Malgré un climat comparable, la signature hydrologique des deux cours d'eau est différente à cause de la géologie

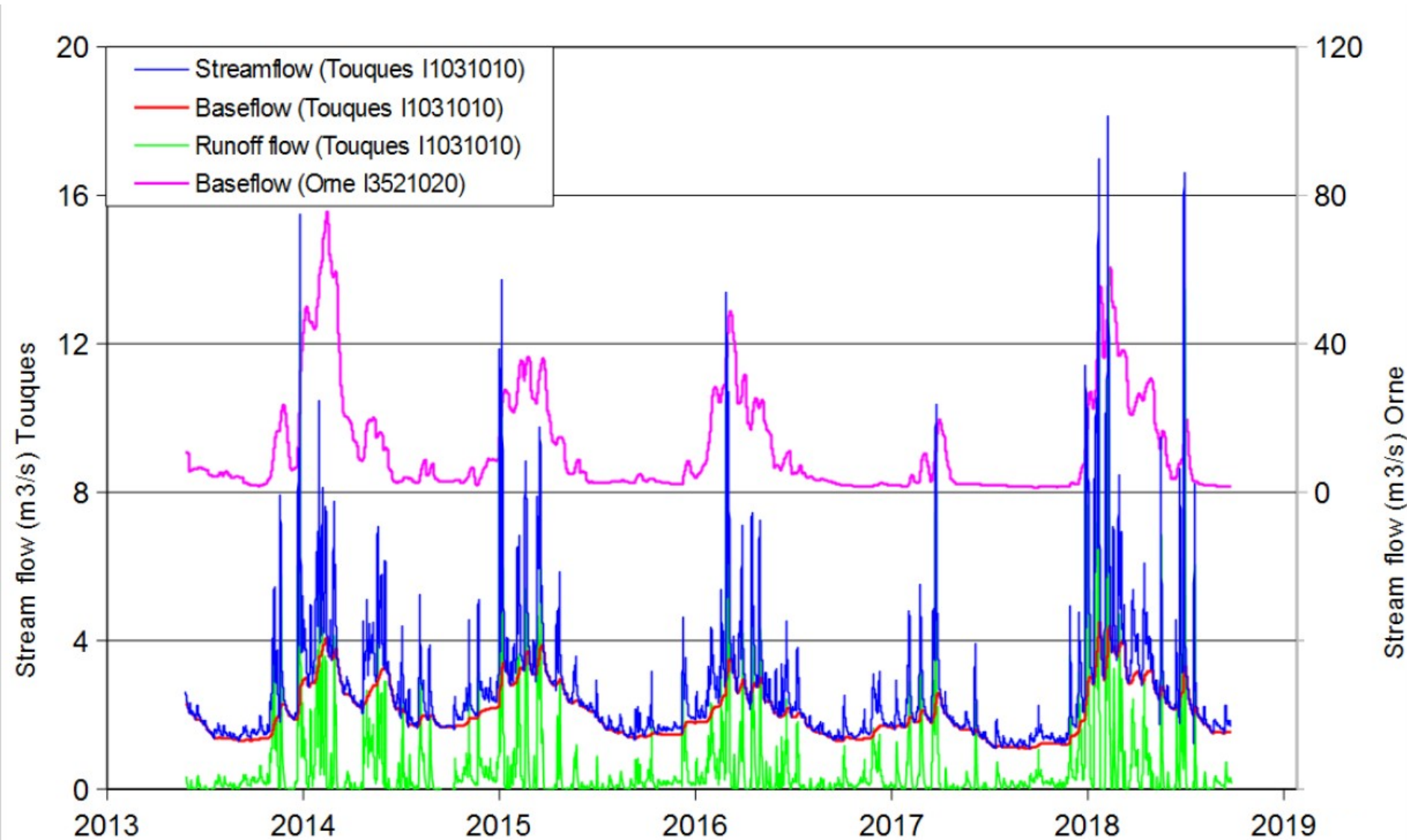
Écoulement moyen annuel
260 mm pour la Touques
270 mm pour l'Orne

Débit en L/s/km²



Débit d'étiage

Séparer dans les chroniques de débit la fraction du débit provenant des nappes de celle issue du ruissellement



Quel pourcentage du débit moyen annuel d'un cours d'eau est produit par les nappes d'eau souterraines ?

Eaux souterraines et milieux aquatiques

socle schisto-gréseux avec forte épaisseur de formations superficielles
75 %-80 %

calcaires de la Campagne de Caen
95 %

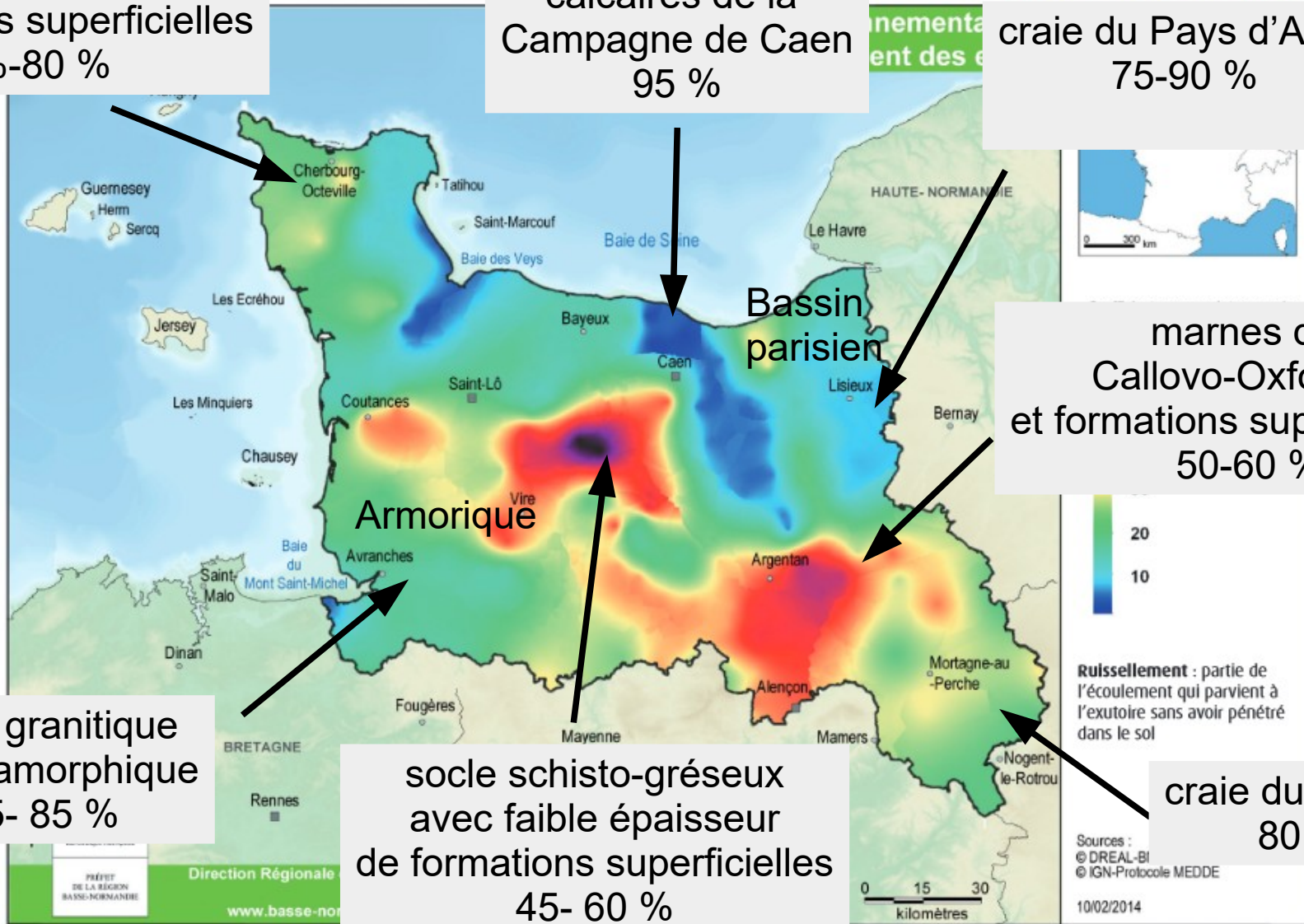
craie du Pays d'Auge
75-90 %

marnes du Callovo-Oxfordien et formations superficielles
50-60 %

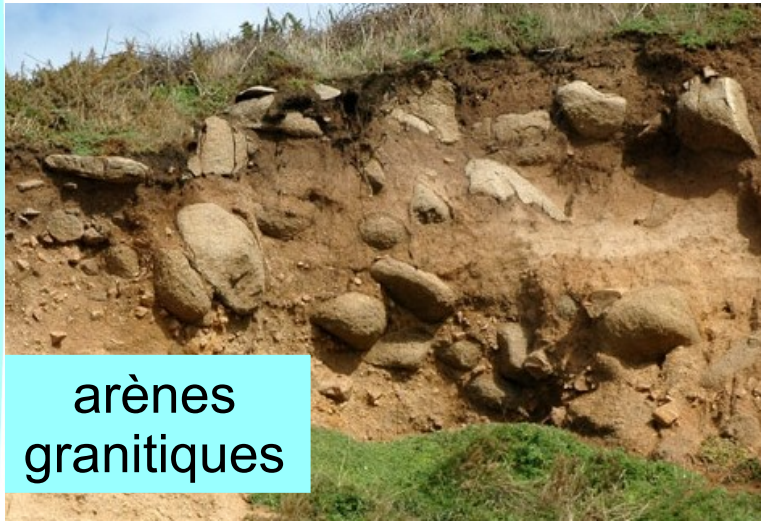
craie du Perche
80 %

socle granitique et métamorphique
75- 85 %

socle schisto-gréseux avec faible épaisseur de formations superficielles
45- 60 %



Les aquifères du bassin versant de l'Orne



arènes
granitiques



colluvions
de pente



grès
fissurés

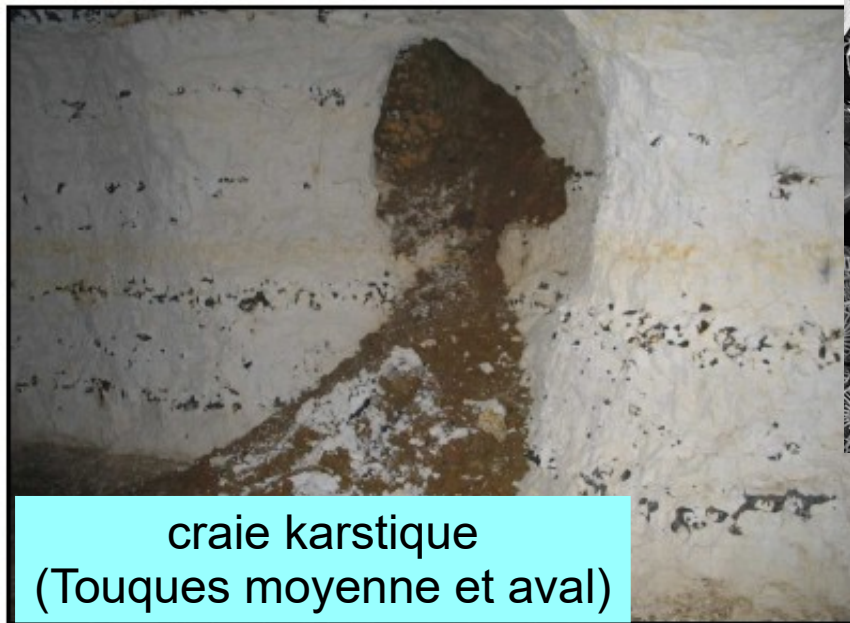


calcaires
(Orne amont
et inférieure)

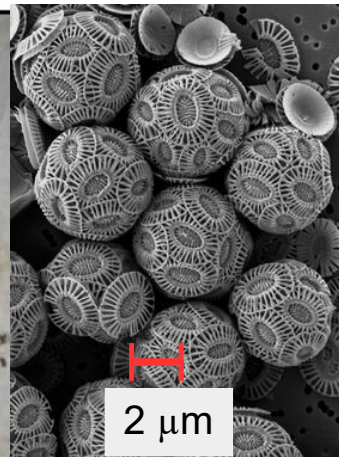


alluvions

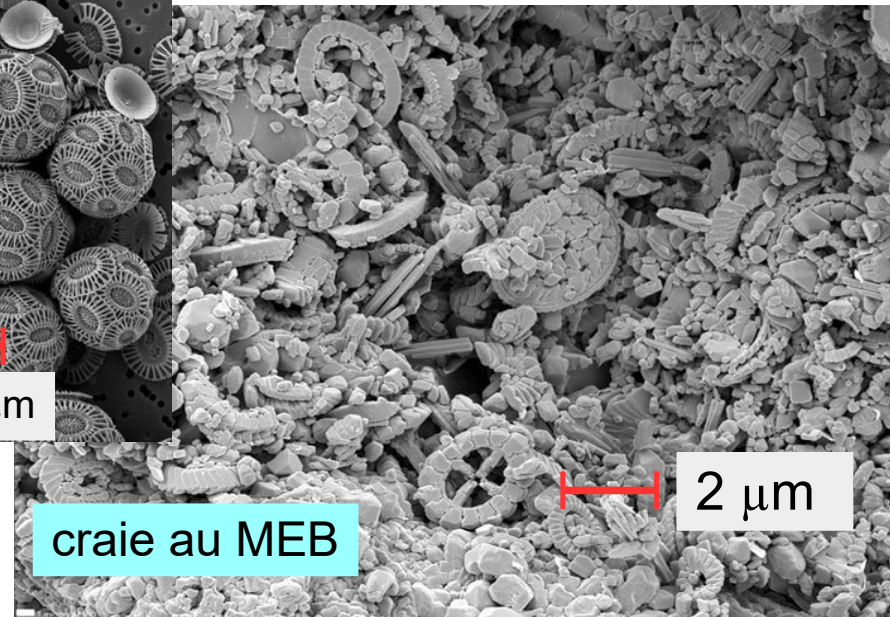
Les aquifères du bassin versant de la Touques



craie karstique
(Touques moyenne et aval)



2 μ m

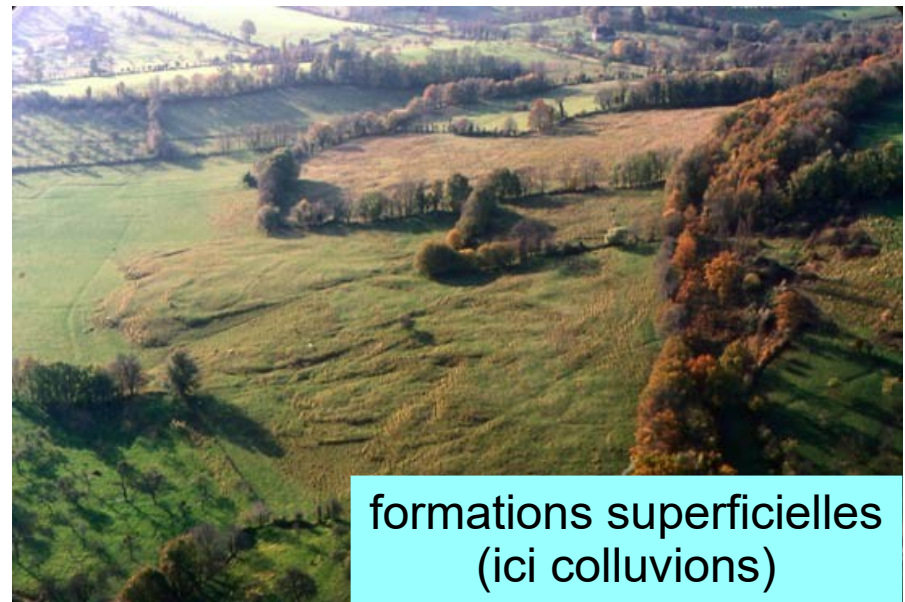


2 μ m

craie au MEB



calcaires et grès oxfordiens
(Touques amont principalement)



formations superficielles
(ici colluvions)

Les aquifères du bassin versant de la Touques



la Risle
source Paris-



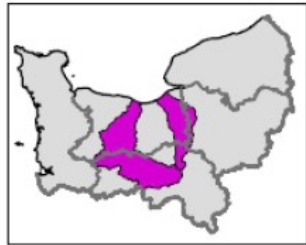
perte de la Risle
source : BRGM

infiltration rapide via le karst

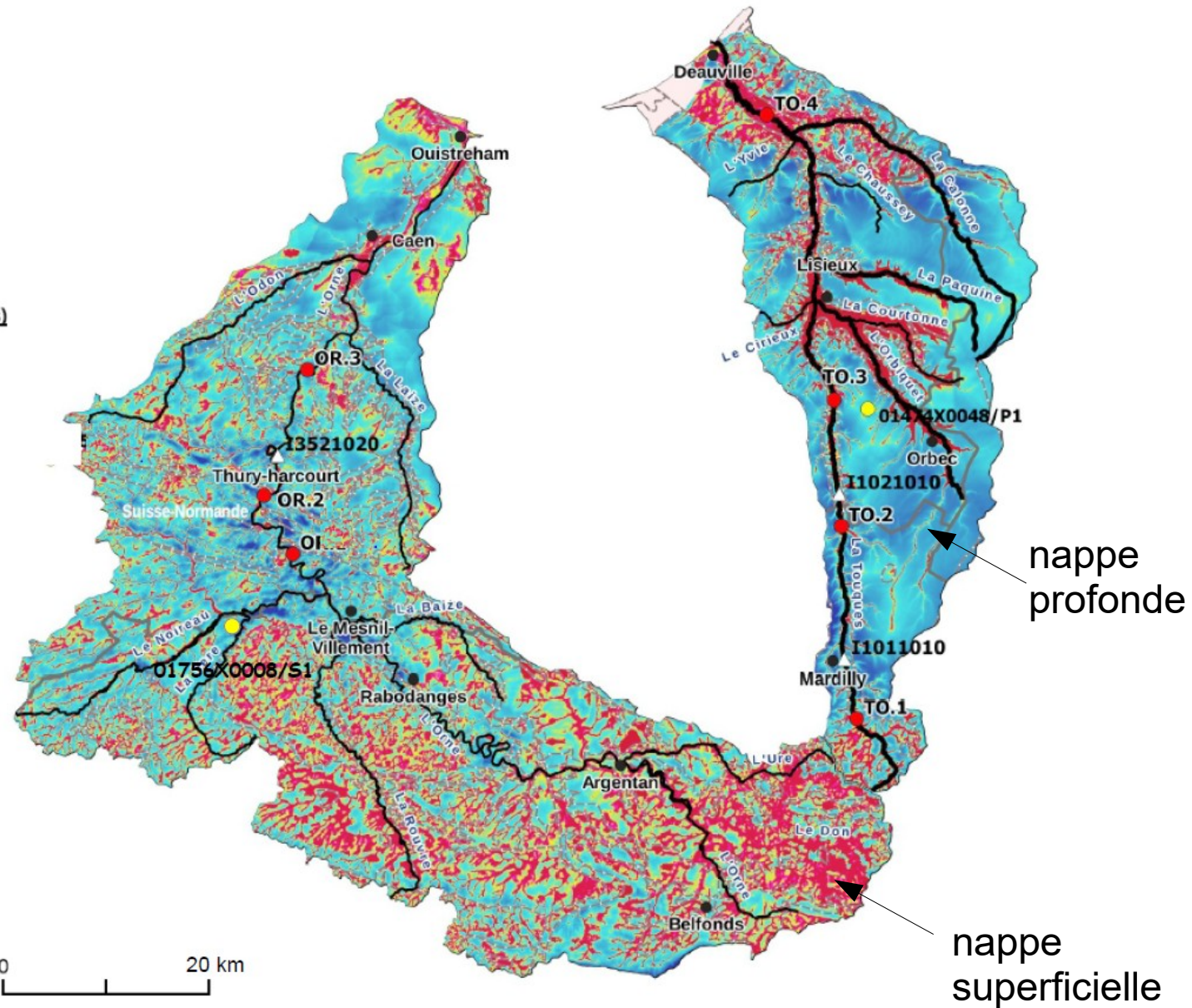
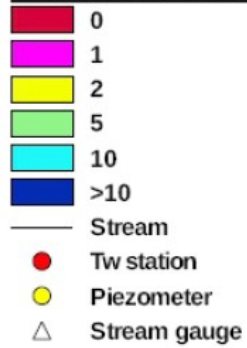
infiltration lente via les
loess et les argiles à silex



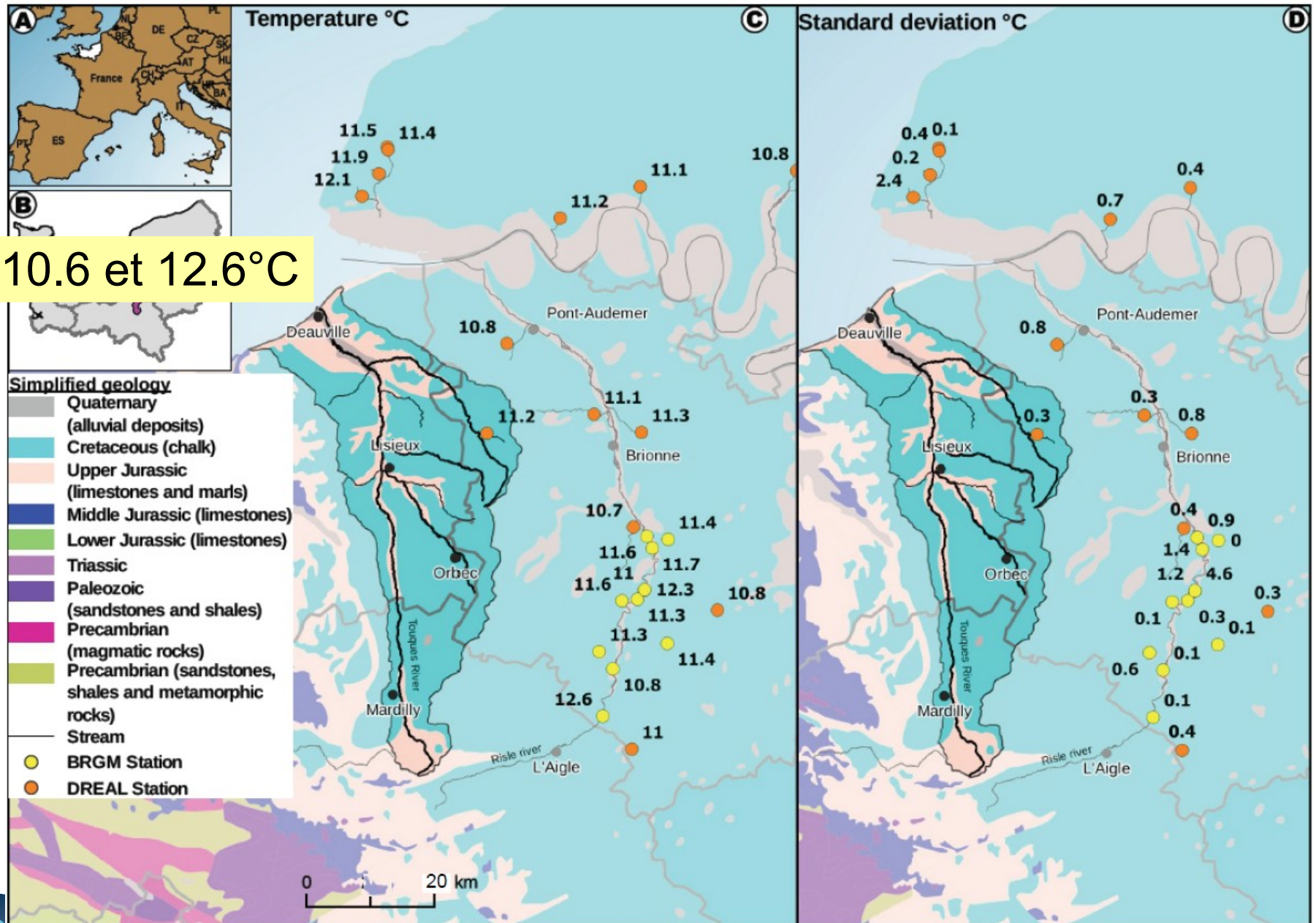
Variation d'épaisseur de la zone non saturée en hiver dans les deux bassins versants



Unsaturated zone thickness (meters)



Température moyenne de l'eau de la nappe de la craie (T°C)



Entre 10.6 et 12.6°C

Sommaire de la présentation

I. Introduction

II. Caractéristiques du territoire étudié et le réseau de suivi thermique

III. Outils et résultats statistiques

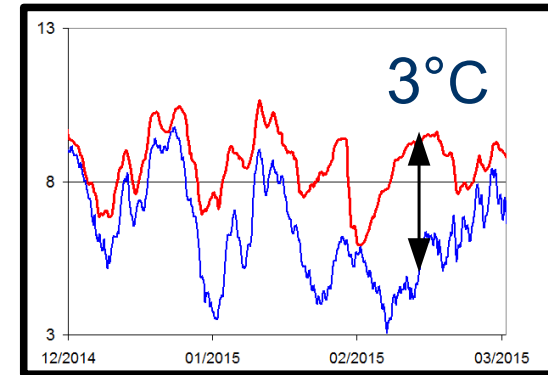
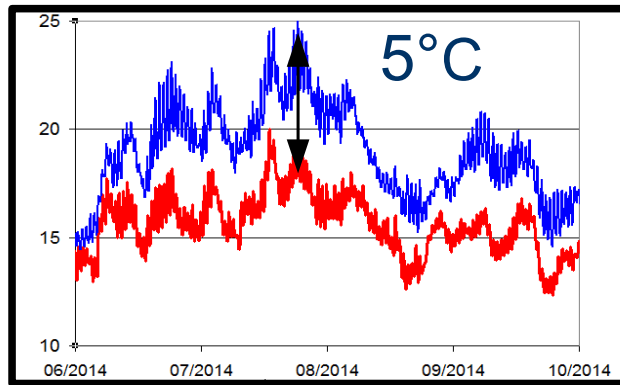
- Corrélation entre la température de l'eau et de l'air
- L'analyse en composante indépendante
 - sur chroniques Tw brutes
 - sur chroniques des différences Tw-Ta
- L'analyse en composante principale

IV. Incidence respective des eaux issus du ruissellement et de la nappe dans la thermie de la Touques

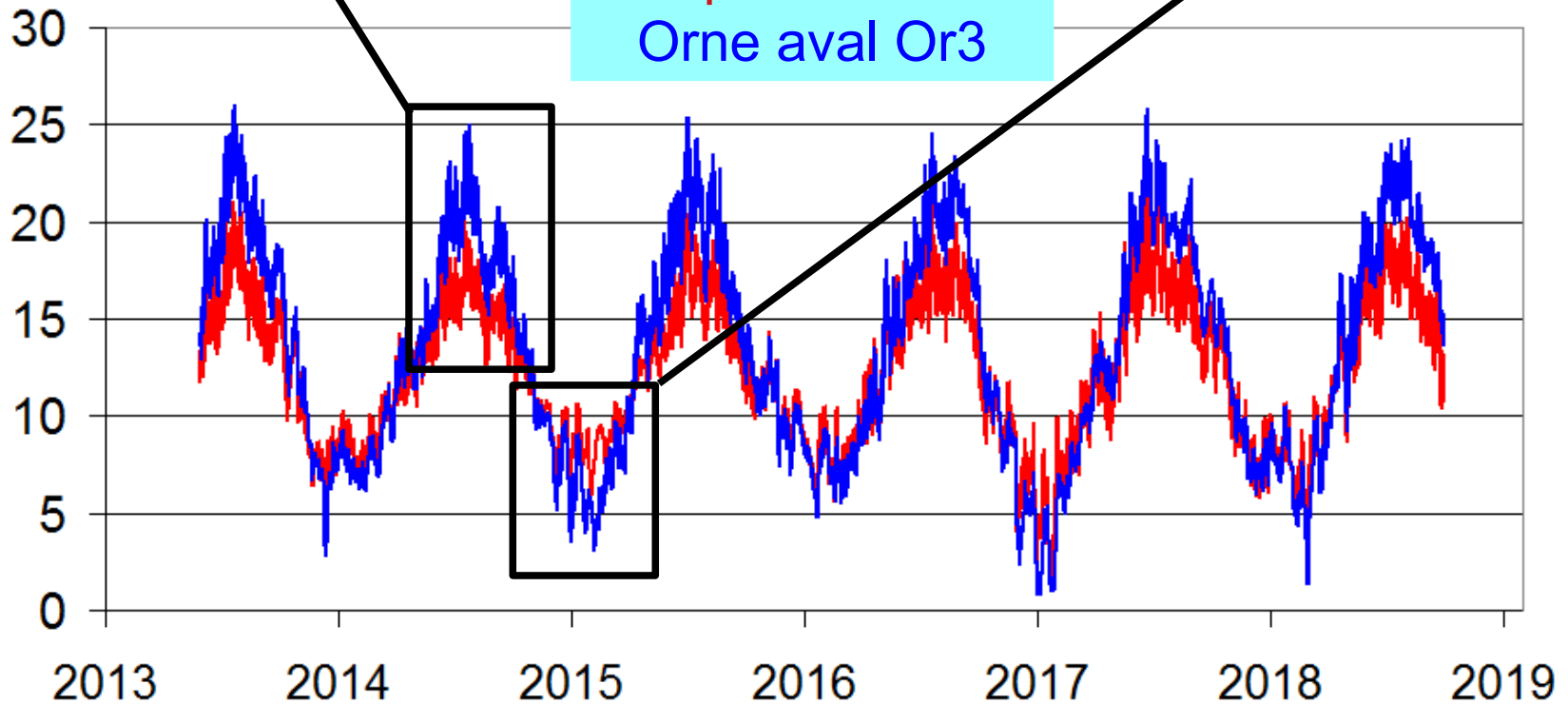
V. Conclusions et perspectives

Les profils thermiques de l'Orne et de la Touques -

T °C



Touques aval To4
Orne aval Or3

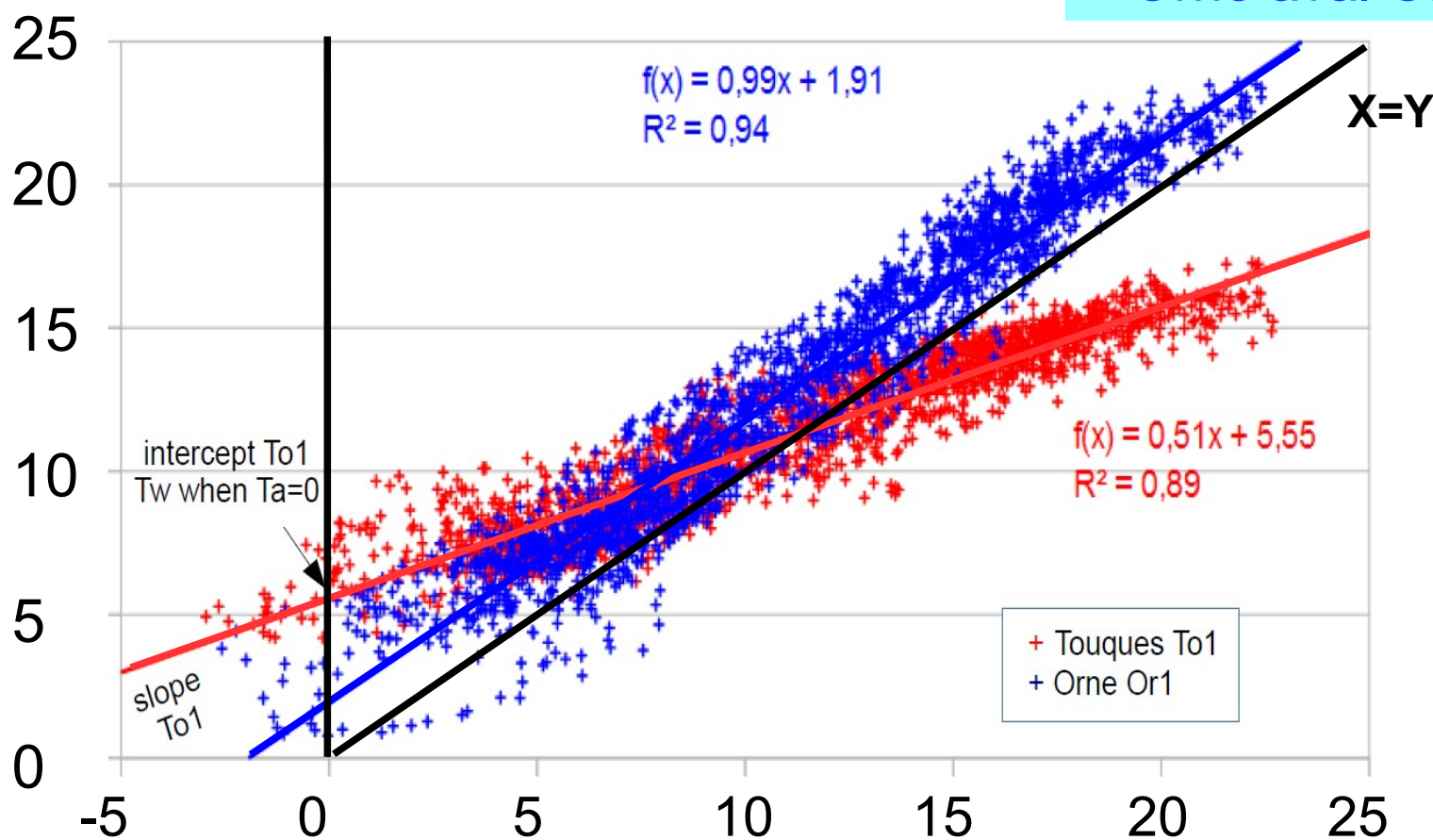


Corrélation entre la température de l'eau et de l'air (données au pas bi-horaire)

Quelle est la température T eau quand T air = 0 ?
Quelle est la pente de la droite de régression ?

Touques aval To1
Orne aval Or1

Température
eau
en °C

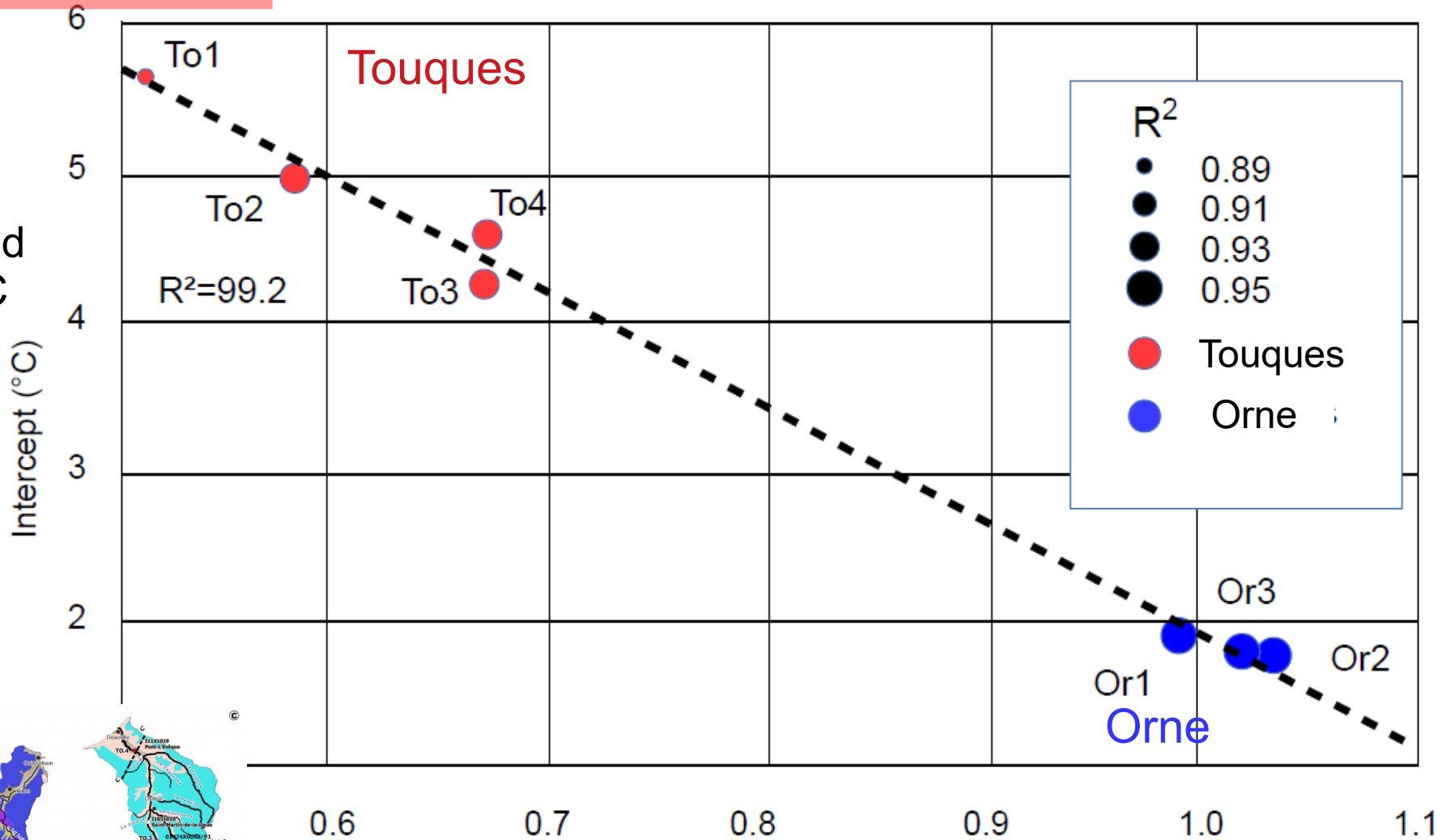


Température air en °C

Méthode O'Driscoll et DeWalle : évaluation de l'influence des eaux souterraines sur Teau

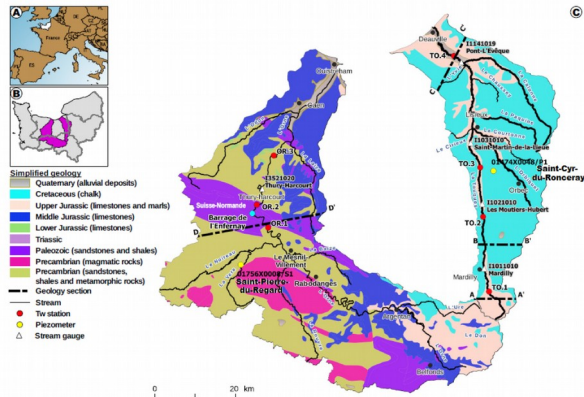
forte influence des eaux souterraines

Teau quand $T_{air} = 0^{\circ}\text{C}$



pente de la droite de régression entre T_{air} et Teau

faible influence des eaux souterraines



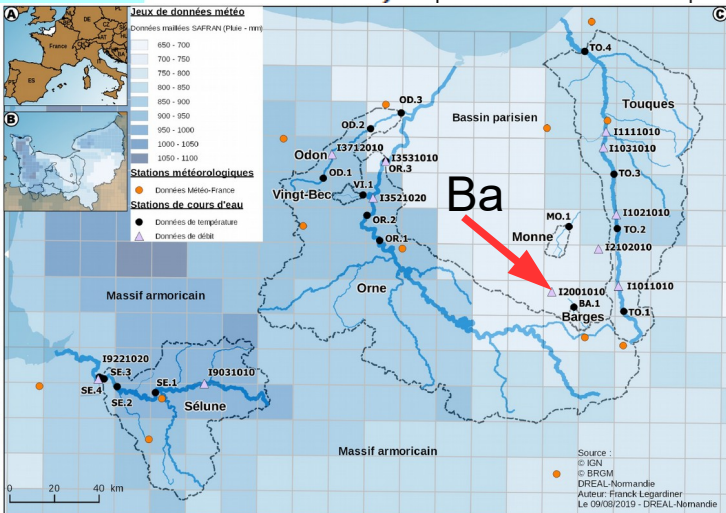
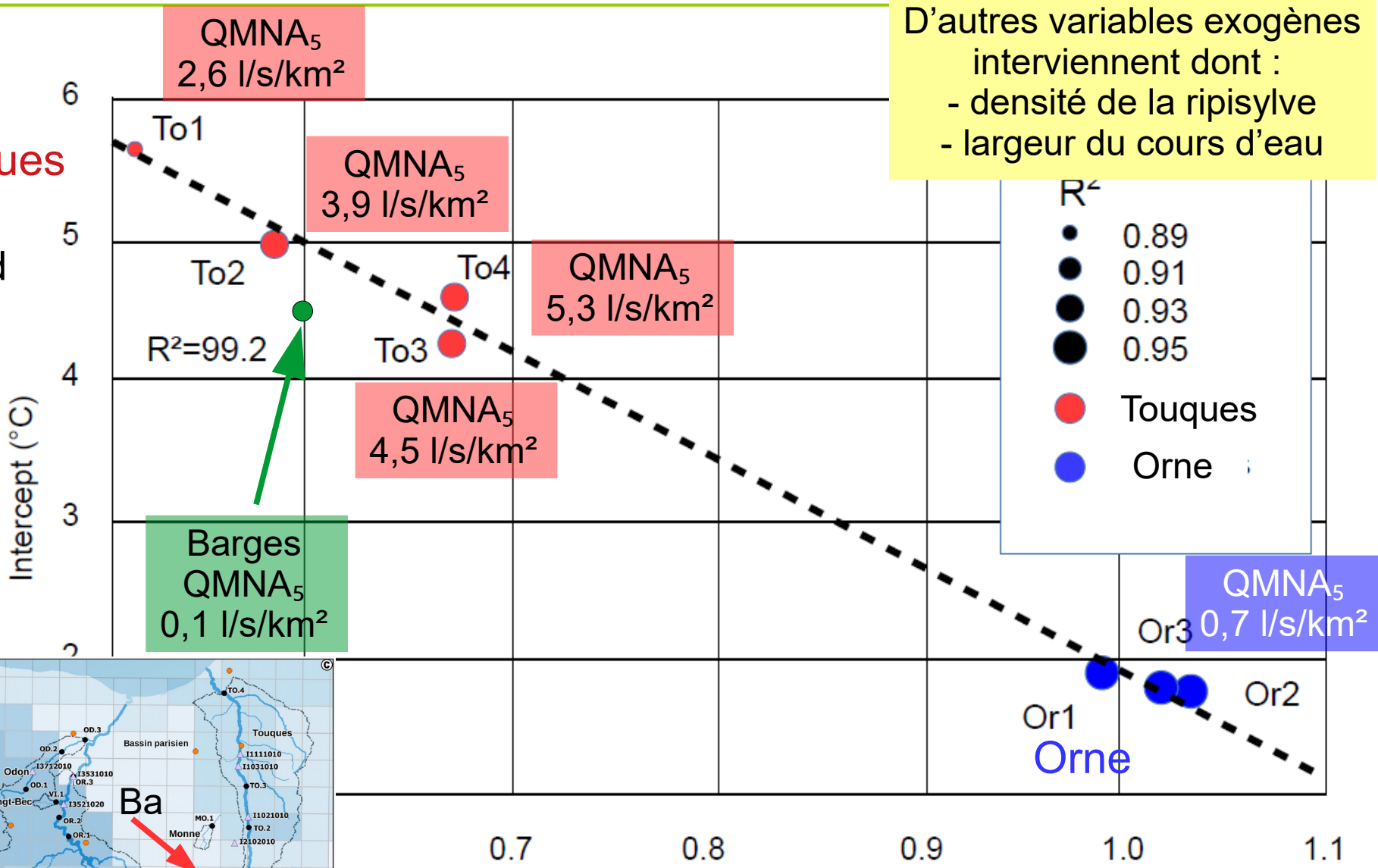
Méthode O'Driscoll et DeWalle : évaluation de l'influence des eaux souterraines sur Teau

D'autres variables exogènes interviennent dont :

- densité de la ripisylve
- largeur du cours d'eau

Touques

Teau quand $T_{air} = 0$



forte pente de la droite de régression entre T_{air} et Teau

faible influence des eaux souterraines

Autres facteurs d'influence



Autres facteurs

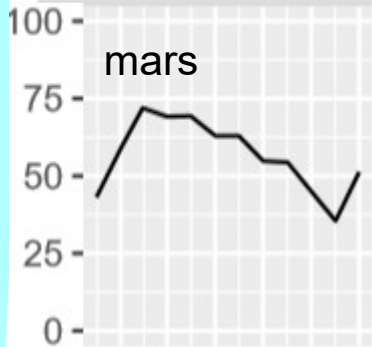
- ruissellement
- débit
- altitude
- distance à la mer
- vent
- pente...



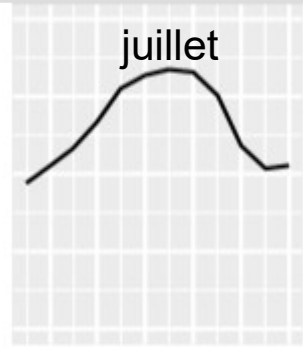
Moyenne mensuelle de la corrélation entre l'amplitude journalière de la température de l'air et celle de l'eau

Corrélation %

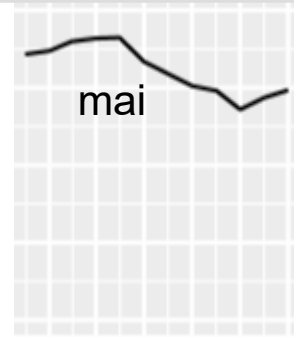
Touques amont To1



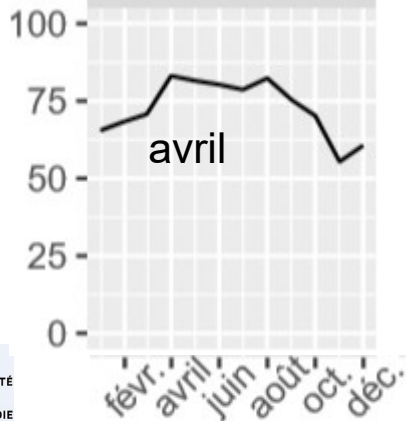
Touques aval To4



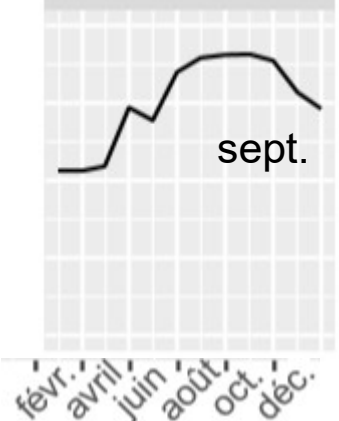
Odon amont Od1



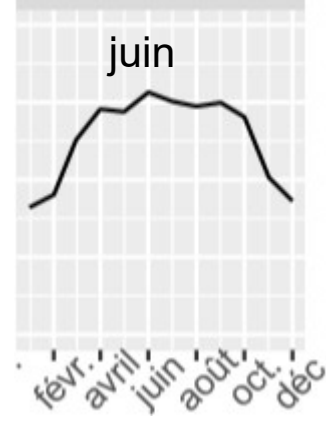
Sélune amont barrages Se1



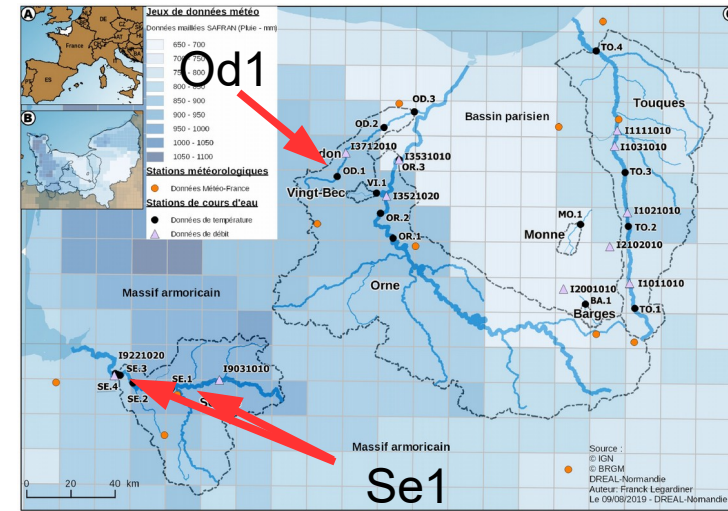
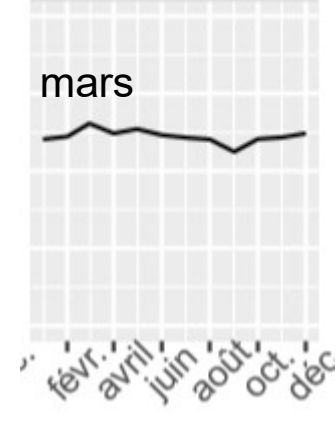
Sélune aval barrages Se4



Orne Suisse normande Or2



Barges Ba1



Se1
Se4

La ripisylve

Couverture végétale autour des cours d'eau de Normandie

Pourcentage de couverture boisée

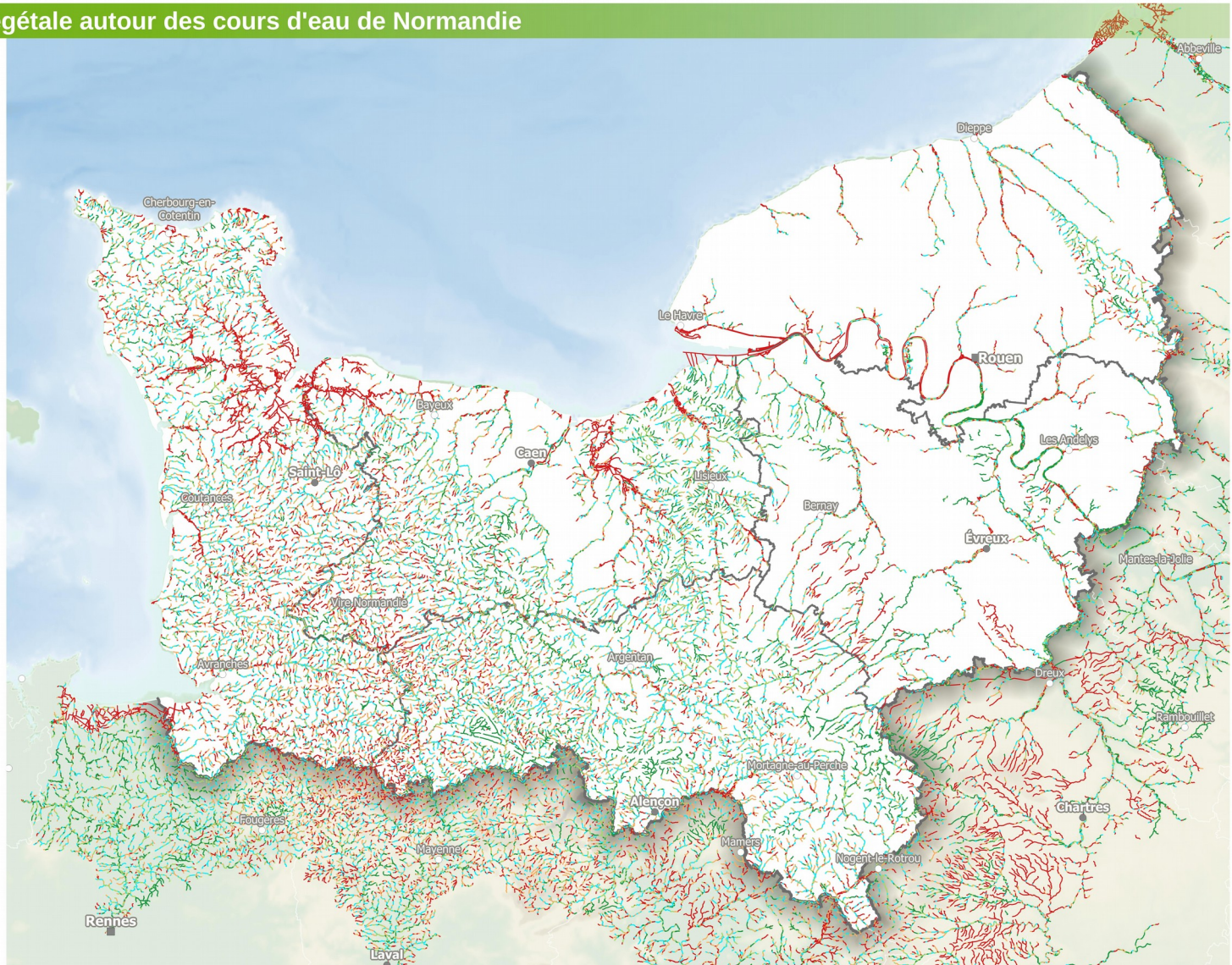
- 0 % - 20 %
- 20 % - 40 %
- 40 % - 60 %
- 60 % - 80 %
- 80 % - 100 %

Echelons administratifs

- Préfecture de région
- Préfecture
- Sous-préfecture
- Commune
- Limites régionales
- Limites départementales

Sources :
Admin Express
BD Topo
BD Topage
DREAL Normandie
Production :
DREAL-NORMANDIE - 16/09/2020

0 15 30 km



Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement - NORMANDIE

www.normandie.developpement-durable.gouv.fr

la pente

Pente des cours d'eau en Normandie

Pente des cours d'eau

- 0 ≤ - < 0,5 %
- 0,5 ≤ - < 2 %
- 2 ≤ - < 5 %
- 5 ≤ - < 10 %
- 10 ≥ - 14 %

Echelons administratifs

- Préfecture de région
- Préfecture
- Sous-préfecture
- Limite régionale

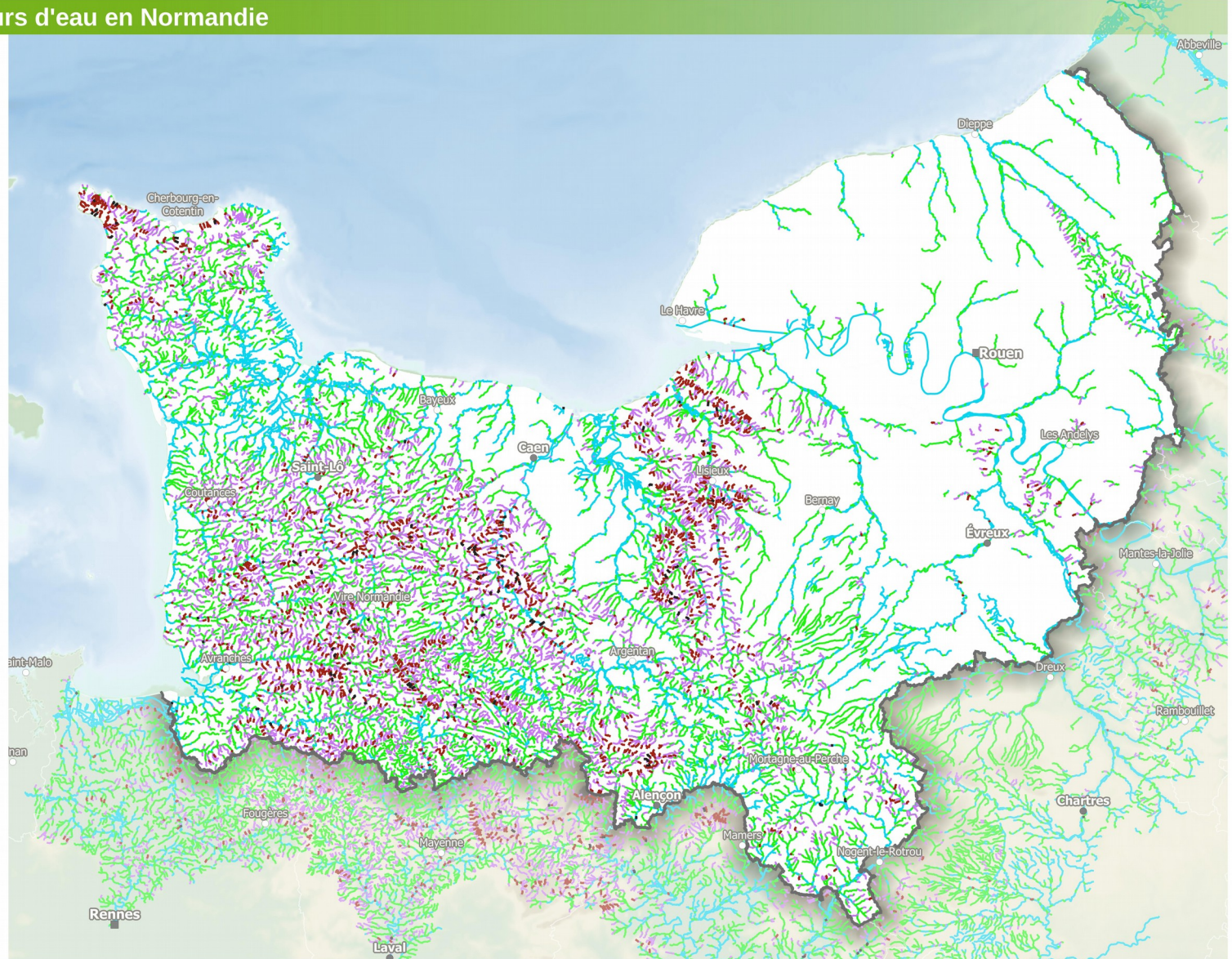
Note:

La pente des cours d'eau est calculée sur la base des géométries "BD Carthage 2017" du RGE ALTI au pas de 5m.

Sources :
BD Carthage
RGE ALTI
Admin Express
DREAL Normandie
Production:
DREAL-NORMANDIE - 17/08/2020

0 15 30 km


**PRÉFET
DE LA REGION
NORMANDIE**
*Liberté
Égalité
Fraternité*



Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement - NORMANDIE

www.normandie.developpement-durable.gouv.fr

Connaître toutes ces variables pour modéliser l'évolution de la Teau tous cours d'eau confondus

Réseau de suivi thermique des cours d'eau de Normandie

Réseau de suivi de la température en rivière

- Station DREAL [34]
- Station OFB [28]

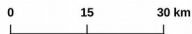
Cours d'eau

- Principal
- Secondaire

Echelons administratifs

- Préfecture de région
- Préfecture
- Sous-préfecture
- Limites régionales
- Limites départementales

Sources :
IGN - Admin Express
DREAL Normandie
OFB
Production:
DREAL-NORMANDIE - 13/08/2020




**PRÉFET
DE LA REGION
NORMANDIE**
*Liberté
Égalité
Fraternité*



Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement - NORMANDIE

www.normandie.developpement-durable.gouv.fr

Sommaire de la présentation

I. Introduction

II. Caractéristiques du territoire étudié et le réseau de suivi thermique

III. Outils et résultats statistiques

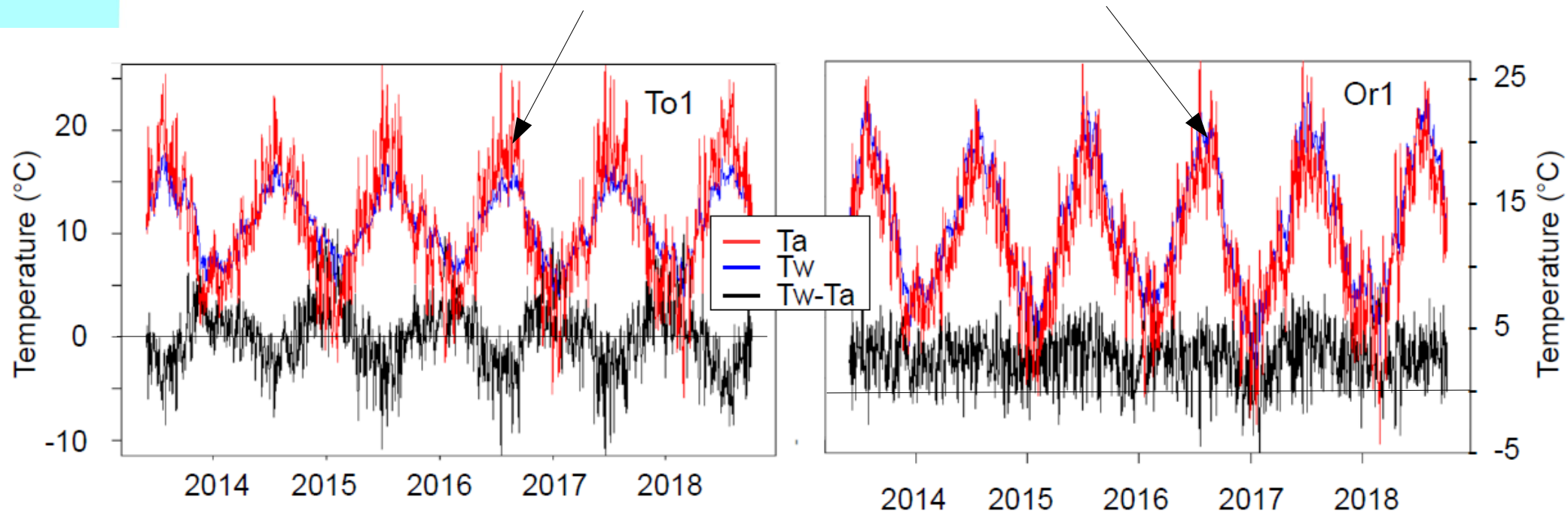
- Corrélation entre la température de l'eau et de l'air
- L'analyse en composante indépendante
 - sur chroniques Tw brutes
 - sur chroniques des différences Tw-Ta
- L'analyse en composante principale

IV. Incidence respective des eaux issus du ruissellement et de la nappe dans la thermie de la Touques

V. Conclusions et perspectives

L'analyse des composantes indépendantes du signal Teau brute et du signal de la différence entre Teau et Tair

Le signal thermique de la Touques est de moindre amplitude que celui de l'Orne et moins bien corrélé à la température de l'air



La variation de la différence $T_w - T_a$ est cyclique. Le cycle est saisonnier. Son amplitude est plus forte pour la Touques que pour l'Orne.

La D ($T_w - T_a$) est presque toujours positive pour l'Orne ($T_w > T_a$)

Pour la Touques, D est négatif en été et positif en hiver. Une source non climatique contribue donc à refroidir l'eau de la Touques en été et à la réchauffer en hiver

Sommaire de la présentation

I. Introduction

II. Caractéristiques du territoire étudié et le réseau de suivi thermique

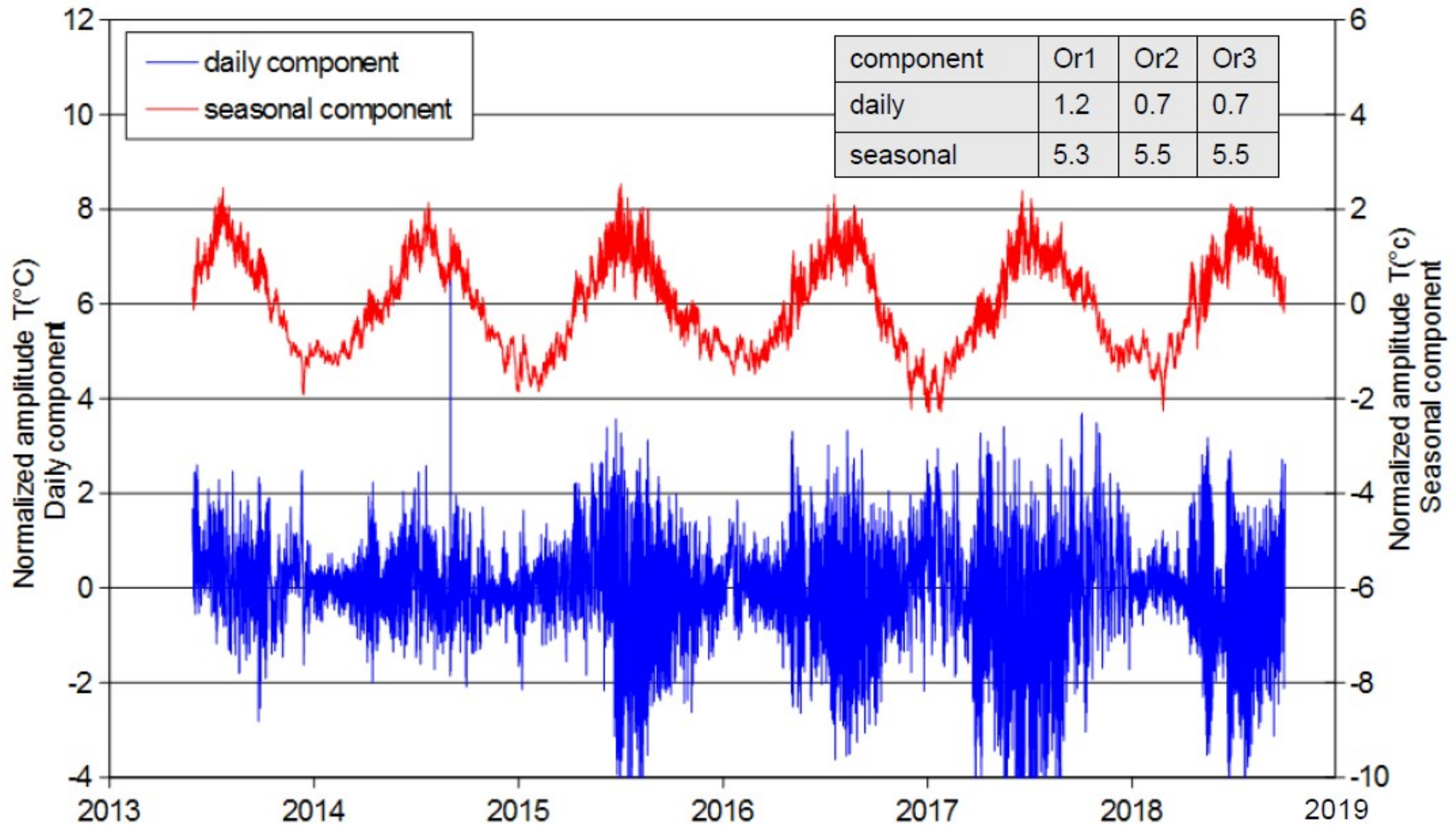
III. Outils et résultats statistiques

- Corrélation entre la température de l'eau et de l'air
- L'analyse en composante indépendante
 - sur chroniques T_w brutes
 - sur chroniques des différences $T_w - T_a$
- L'analyse en composante principale

IV. Incidence respective des eaux issus du ruissellement et de la nappe dans la thermie de la Touques

V. Conclusions et perspectives

Séparation par ACI des deux principales composantes du signal thermique brut de l'Orne

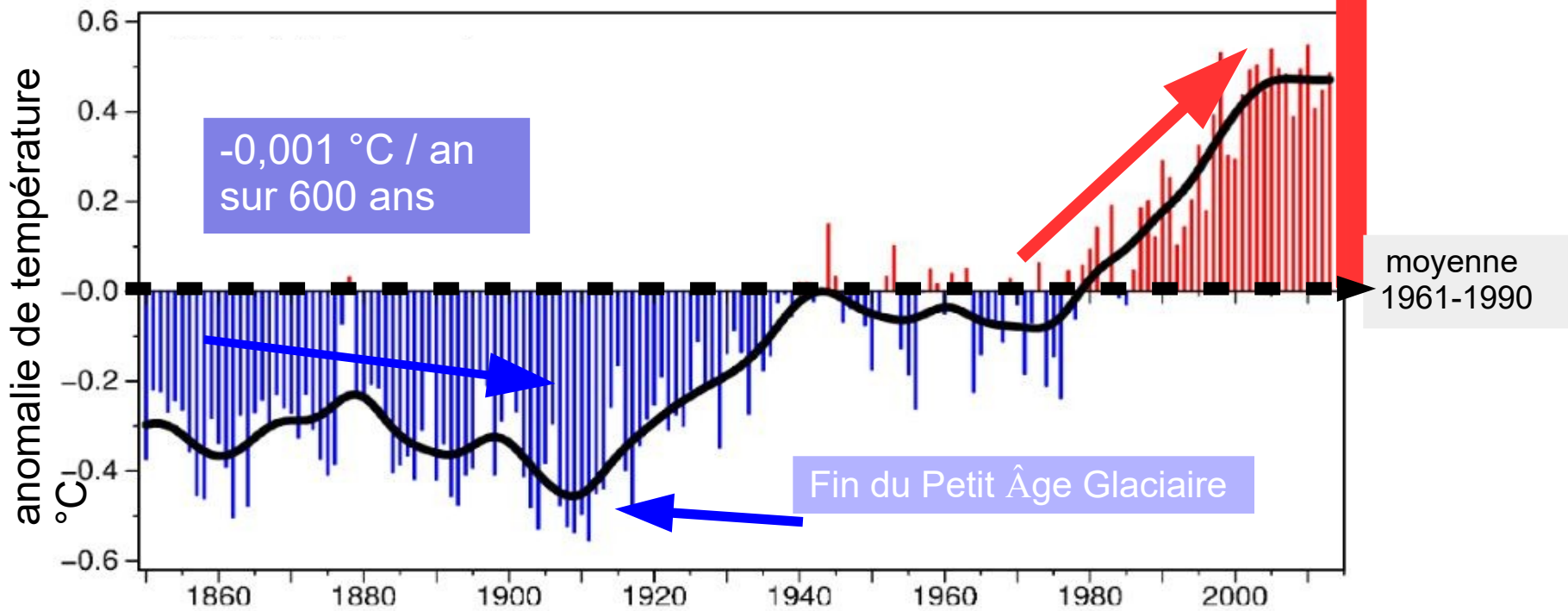


1 composante saisonnière
1 composante journalière

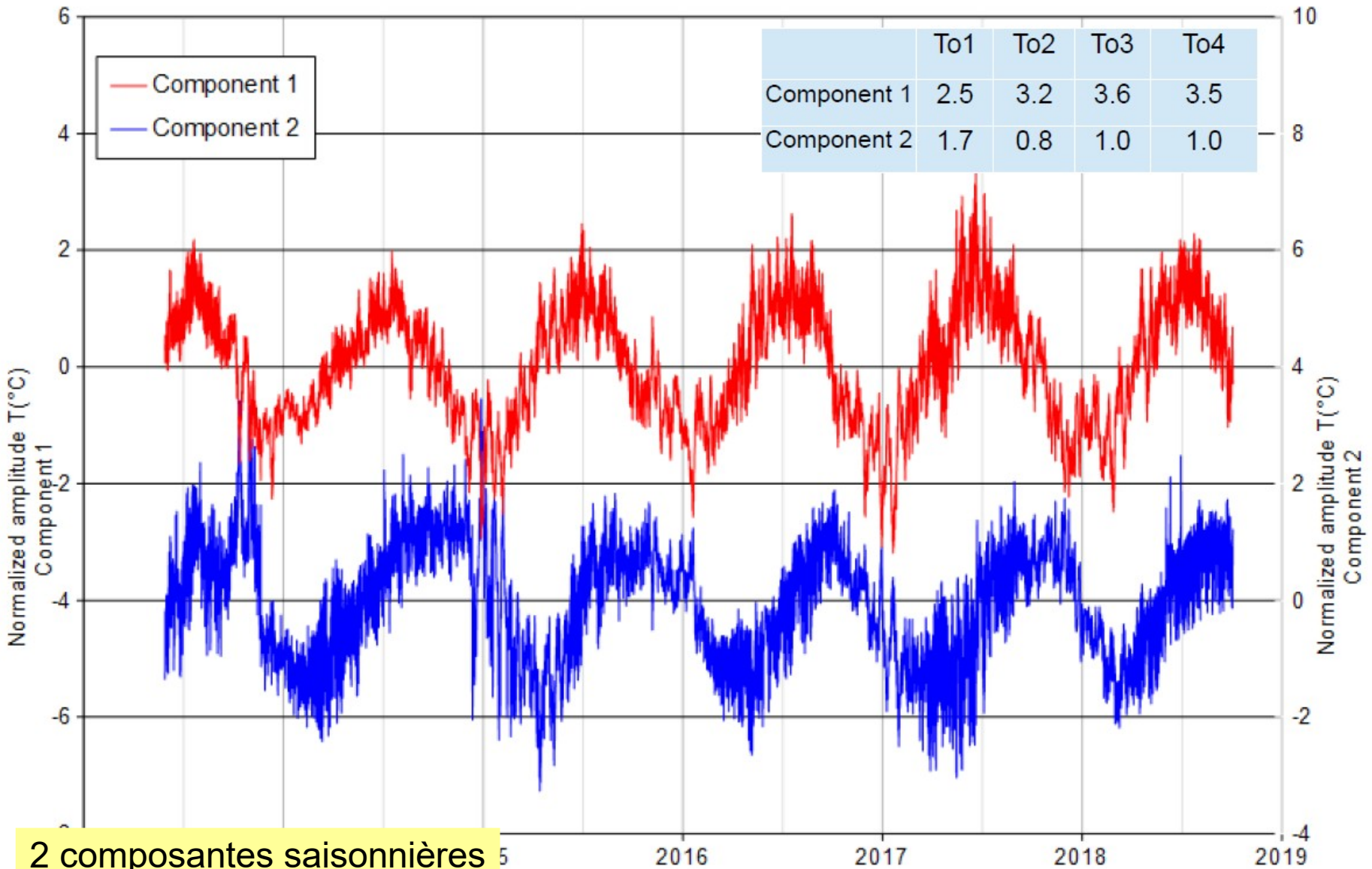
Un changement notable dans la température moyenne mondiale depuis 2014



L'évolution de la température mondiale : anomalie par rapport à la moyenne des températures de 1961 à 1990

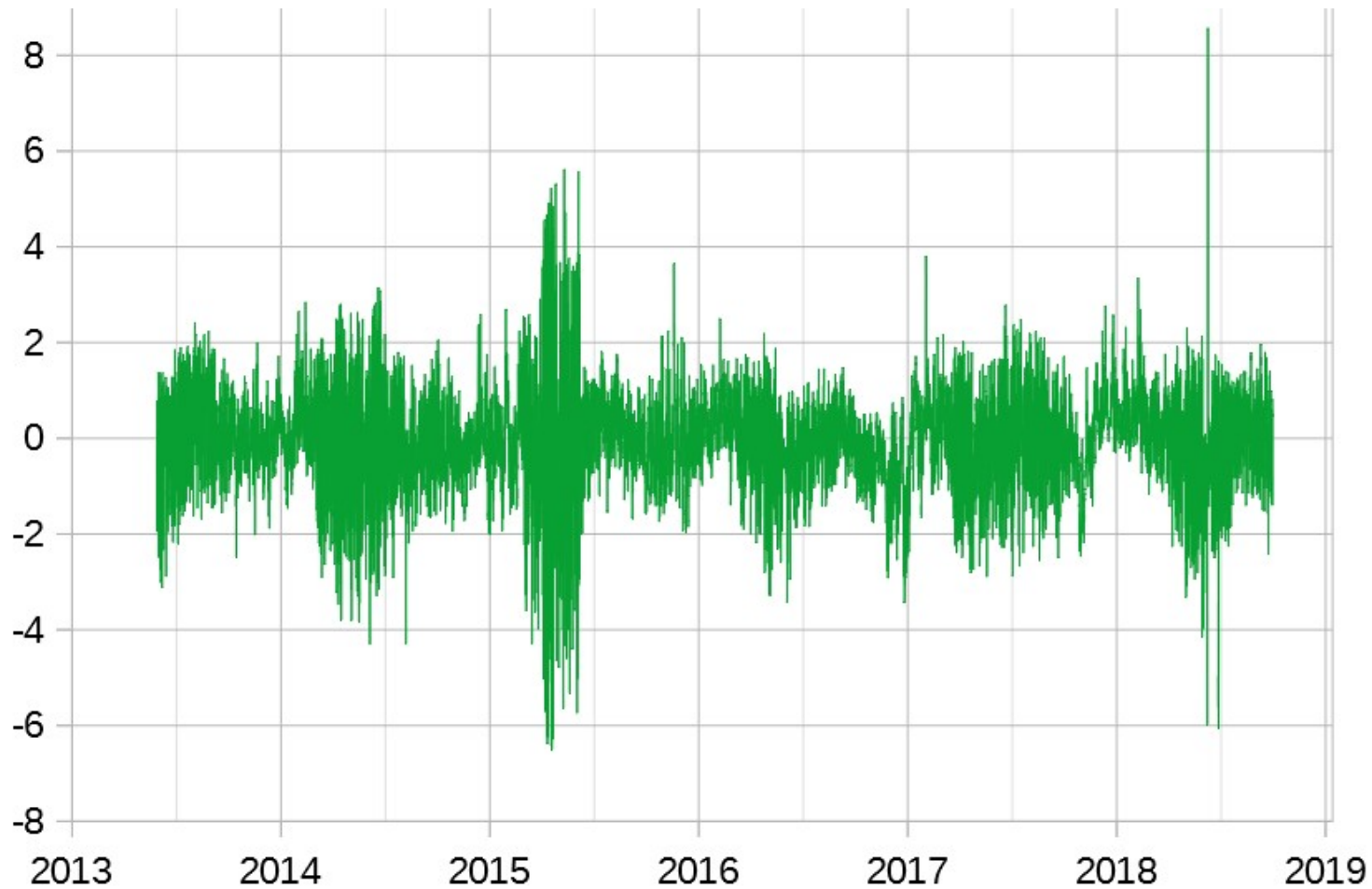


Séparation par ACI des deux principales composantes du signal thermique brut de la Touques



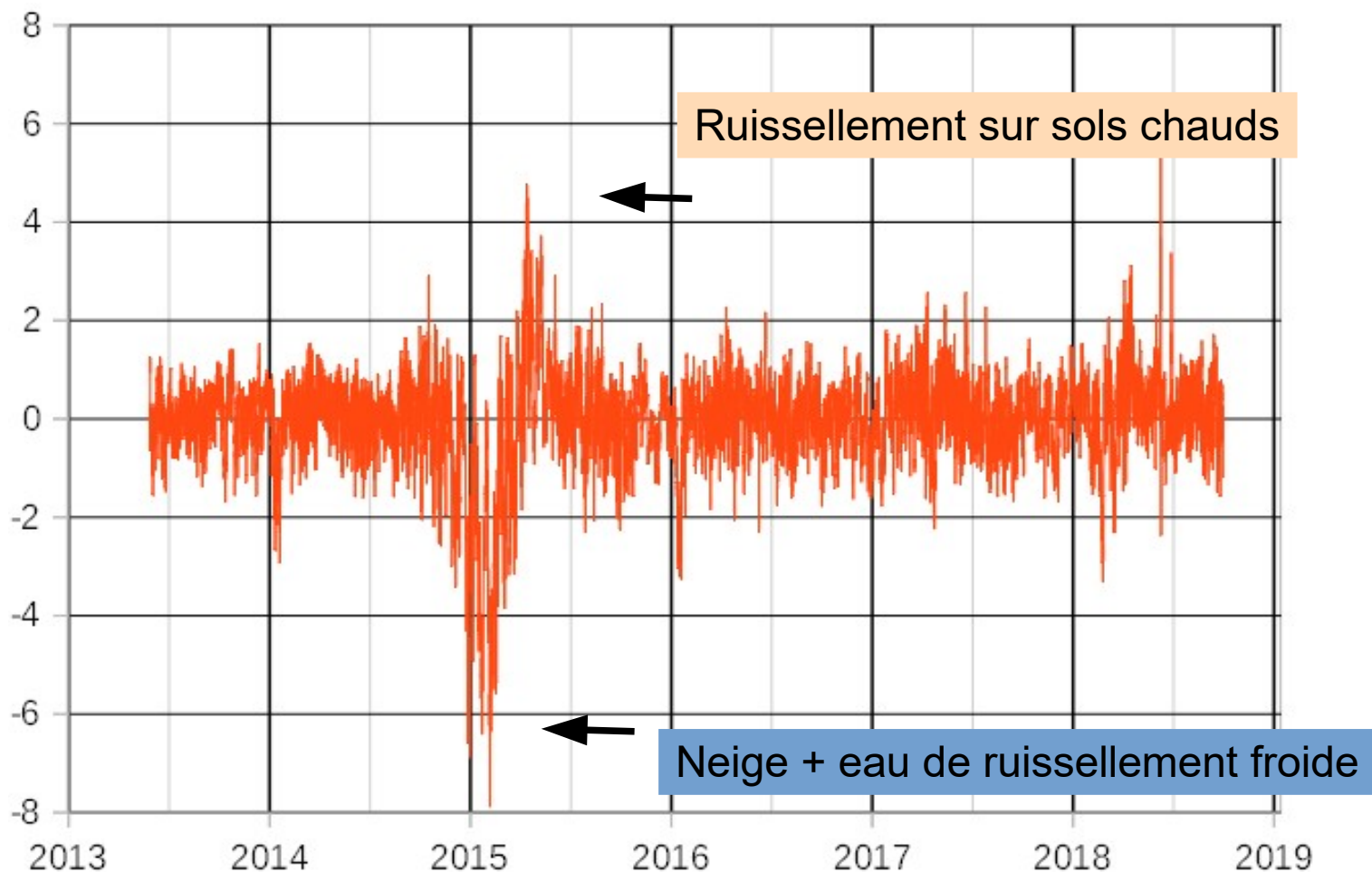
2 composantes saisonnières déphasées

Le signal brut de la Touques abrite d'autres composantes diagnostiquées par ACI



station	To1	To2	To3	To4
Composante 3	-0,05	-0.4	-0,1	-0,15

Composante 4 de la Touques porte la trace d'événements atypiques (ruissellement sur sol chaud, fonte de neige) et des variations météorologiques brutales



station	To1	To2	To3	To4
Composante 4	0,6	1,3	1,4	1

Sommaire de la présentation

I. Introduction

II. Caractéristiques du territoire étudié et le réseau de suivi thermique

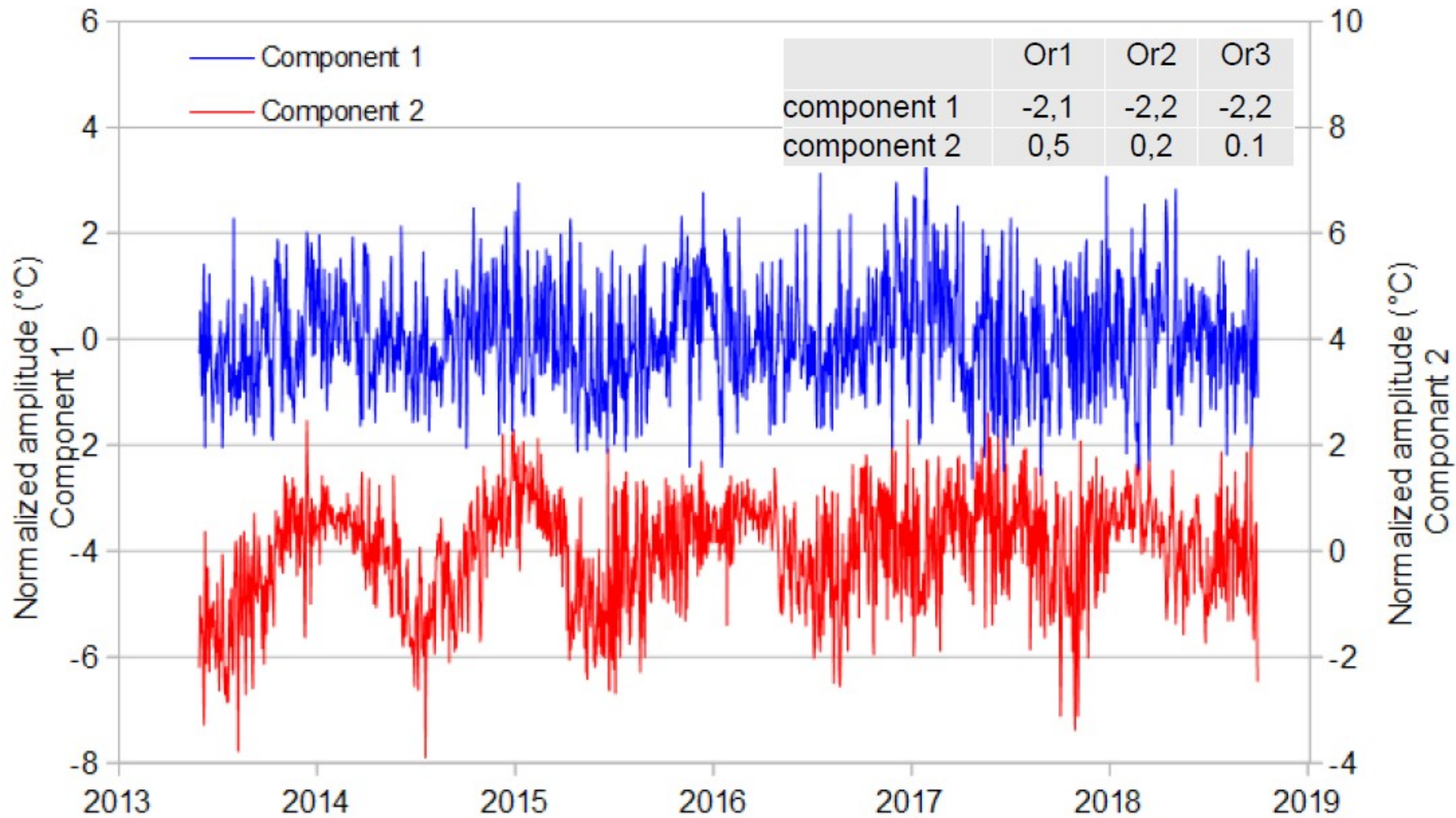
III. Outils et résultats statistiques

- Corrélation entre la température de l'eau et de l'air
- L'analyse en composante indépendante
 - sur chroniques Tw brutes
 - sur chroniques des différences Tw-Ta
- L'analyse en composante principale

IV. Incidence respective des eaux issus du ruissellement et de la nappe dans la thermie de la Touques

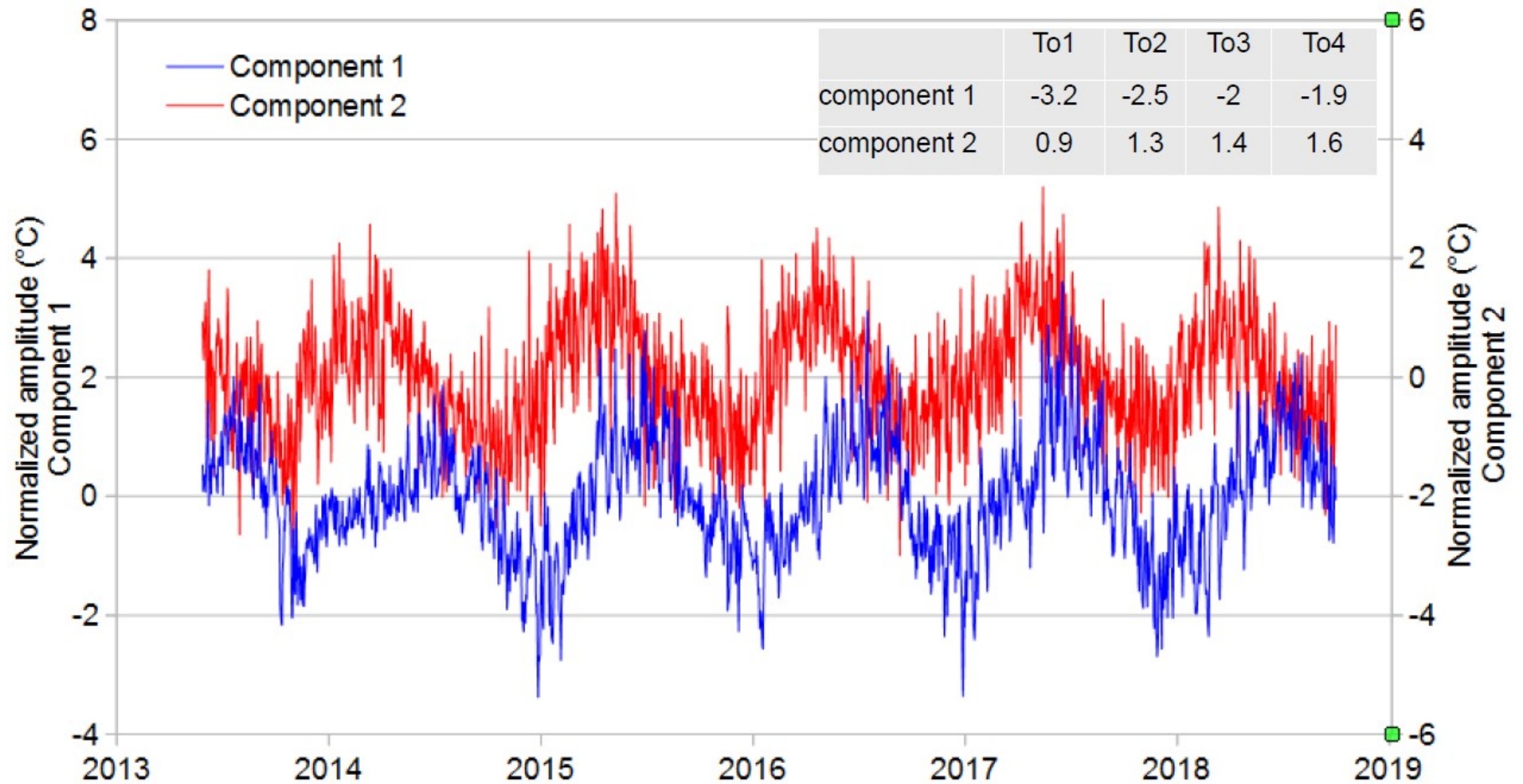
V. Conclusions et perspectives

ACI sur D (Tw-Ta) : l'Orne



Tw-Ta Orne : 2 composantes indépendantes C1 et C2

ACI sur D (Tw-Ta) : la Touques



2 composantes C1 et C2 saisonnières déphasées et en partie opposées
C1 décline d'amont en aval
C2 s'intensifie d'amont en aval

Sommaire de la présentation

I. Introduction

II. Caractéristiques du territoire étudié et le réseau de suivi thermique

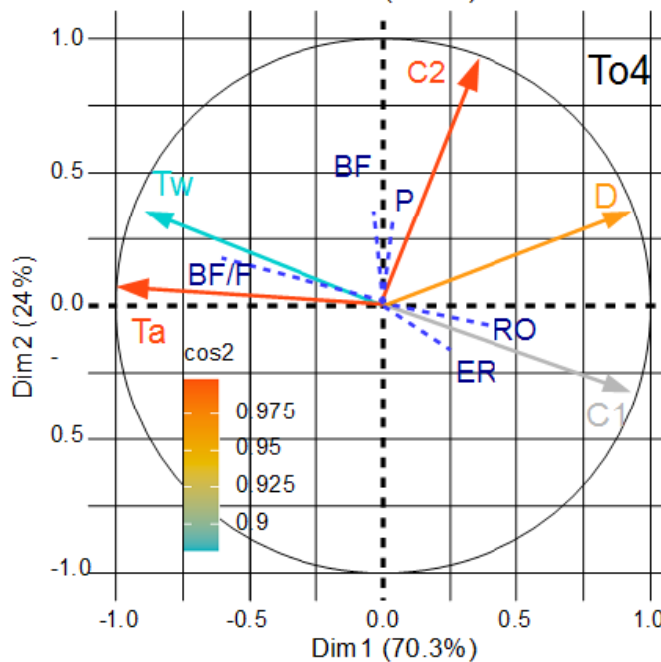
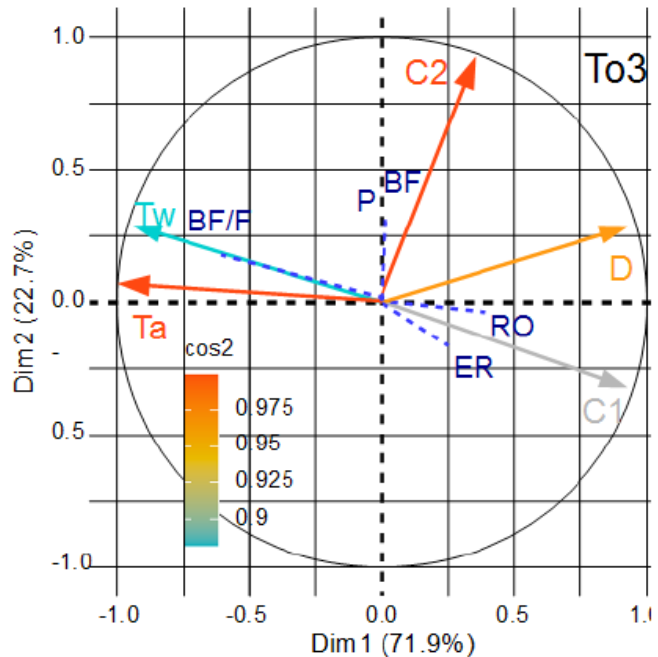
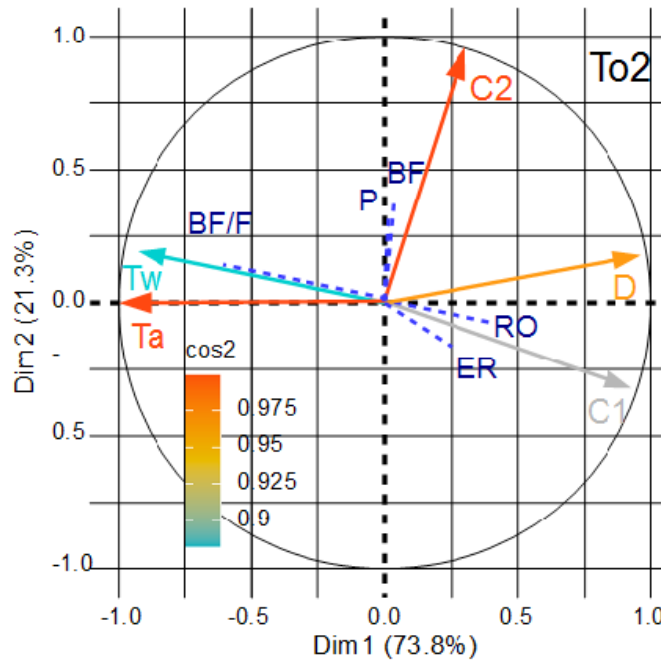
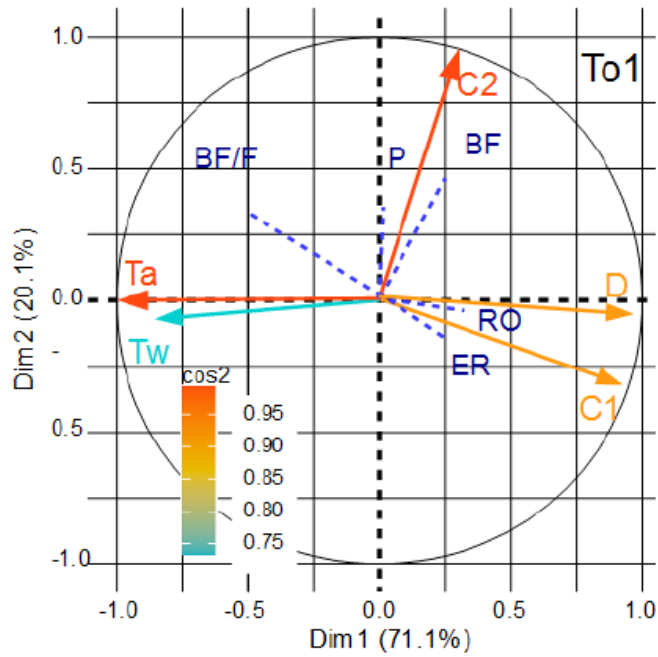
III. Outils et résultats statistiques

- Corrélation entre la température de l'eau et de l'air
- L'analyse en composante indépendante
 - sur chroniques T_w brutes
 - sur chroniques des différences $T_w - T_a$
- L'analyse en composante principale

IV. Incidence respective des eaux issus du ruissellement et de la nappe dans la thermie de la Touques

V. Conclusions et perspectives

ACP portant sur les composantes 1 et 2 de l'ACI de D : la Touques



C1 et C2 : les deux composantes extraites par ACI

BF : le débit produit par les eaux souterraines

RO : le débit produit par ruissellement s'écoulant dans le cours d'eau

P : piézométrie de la nappe

D : la différence $T_w - T_a$

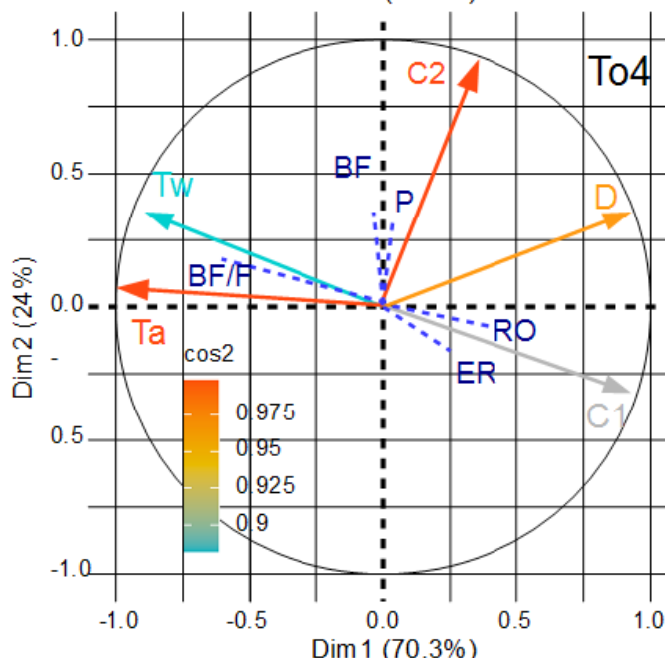
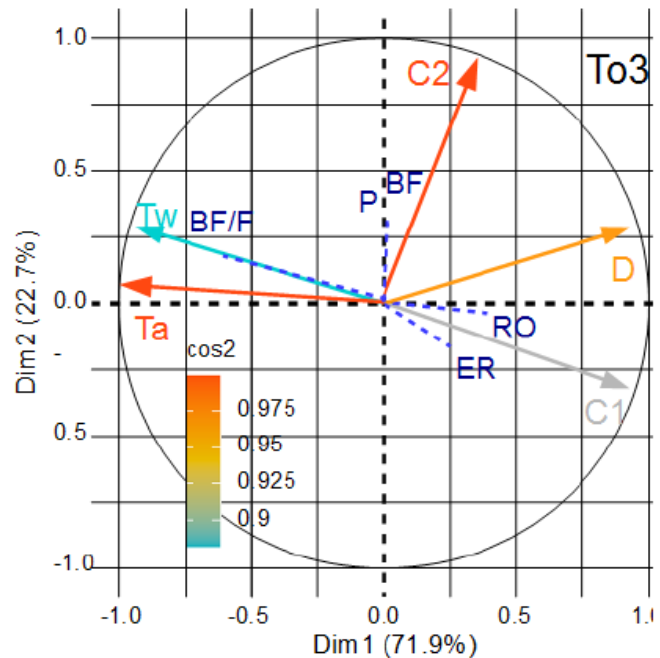
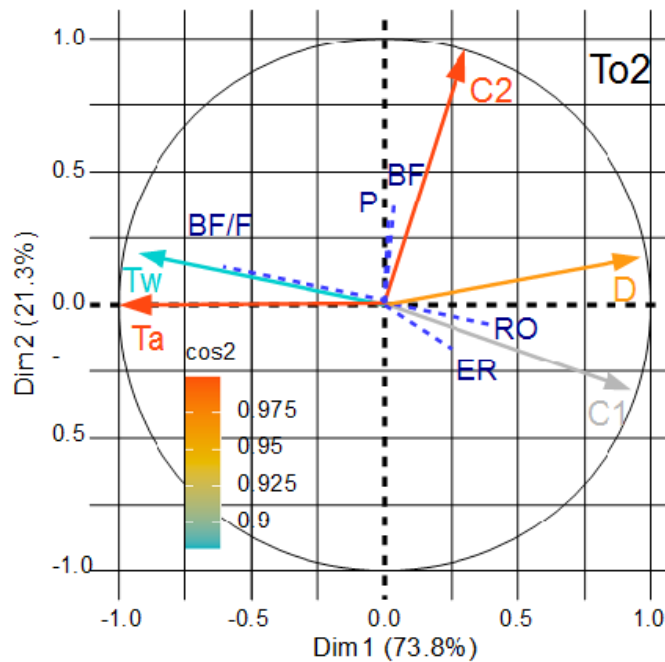
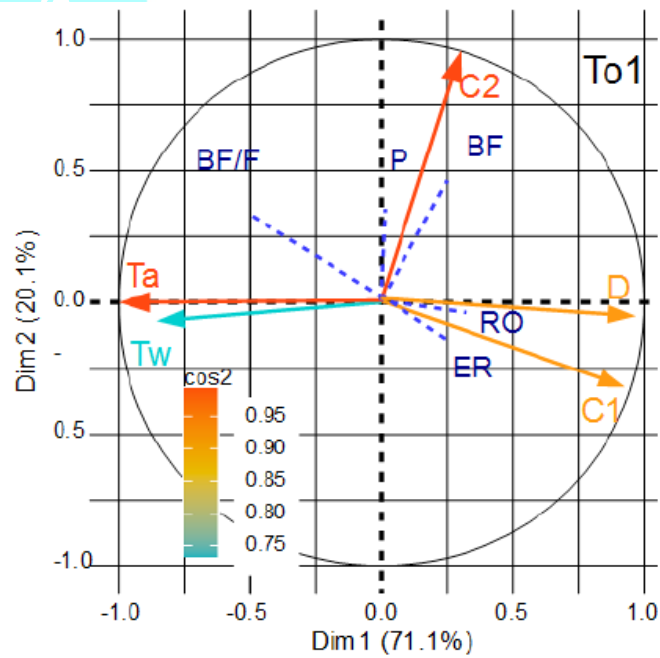
T_w : température de l'eau

T_a : température de l'air

nappe

ruissellement

ACP portant sur les composantes 1 et 2 de l'ACI de D : la Touques



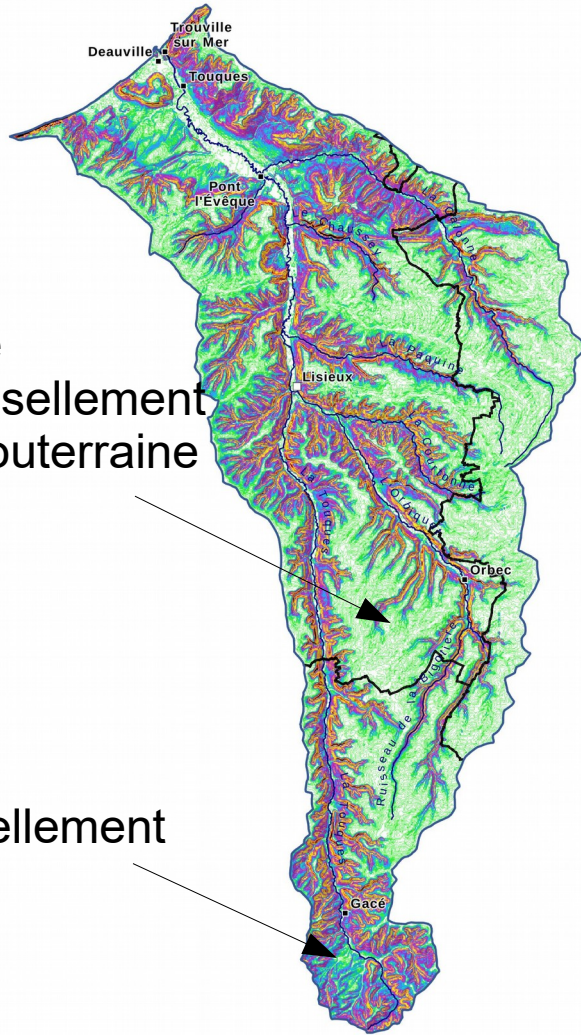
C1 liée au ruissellement RO
C2 indépendante de Tair
C2 liée à la piézométrie P
et au débit de base du
cours d'eau BF (nappe)
La différence D (Tw-Ta) est
proche du ruissellement en
amont (To1) et s'en éloigne vers
l'aval. Elle s'oriente vers C2.

Le ruissellement perd du
contrôle sur D d'amont en aval
alors que la nappe gagne en
influence.

L'influence de la nappe croît
d'amont en aval ce qui contredit
les interprétations conduites
à partir du diagramme
de O'Driscoll (corrélation Ta/Tw)

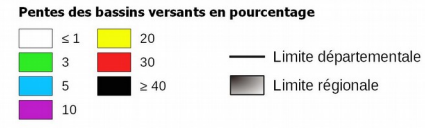
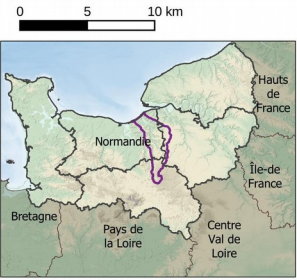
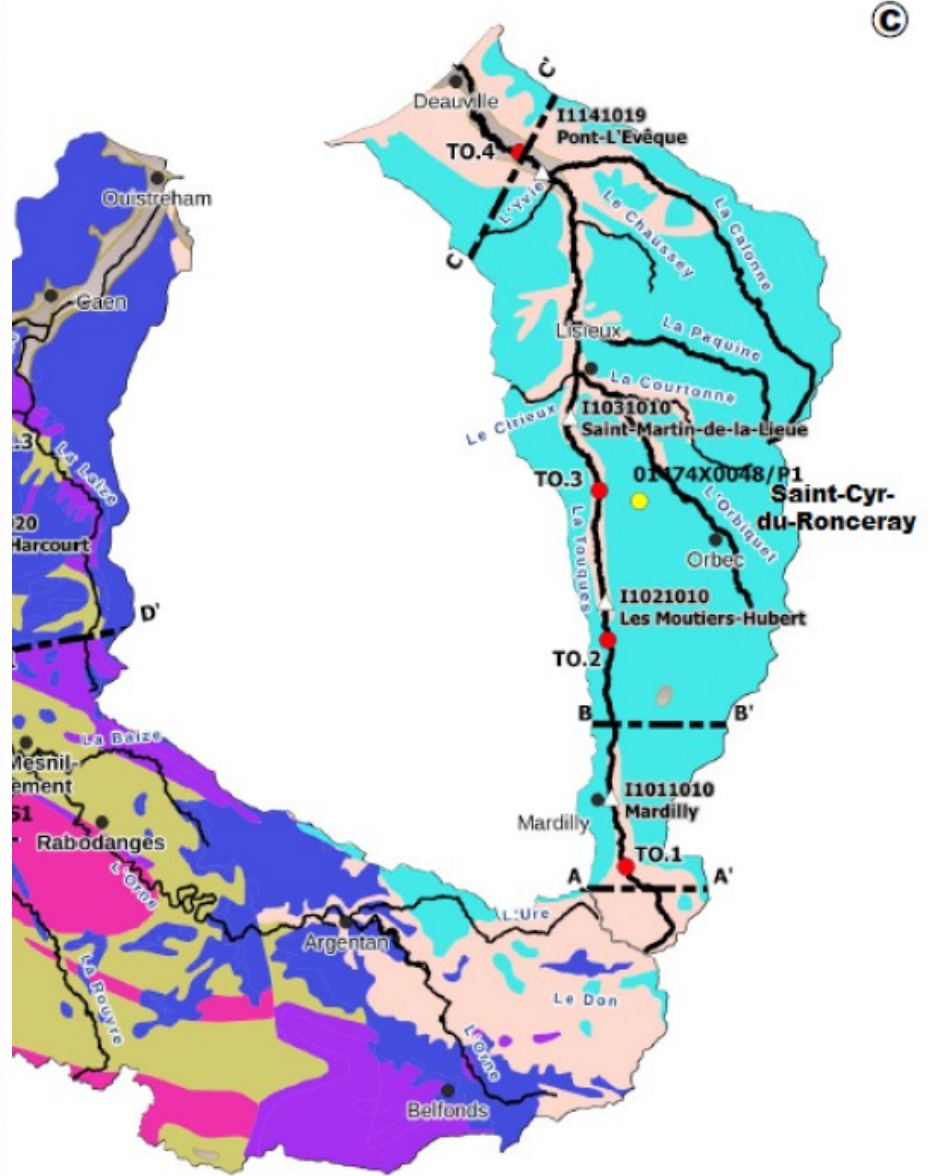
C1 et C2 semblent être respectivement les composantes nappe et ruissellement du débit

PENTES DU BASSIN VERSANT DE LA TOUQUES



moins de pente
= moins de ruissellement
et plus d'eau souterraine

plus de pente
= plus de ruissellement

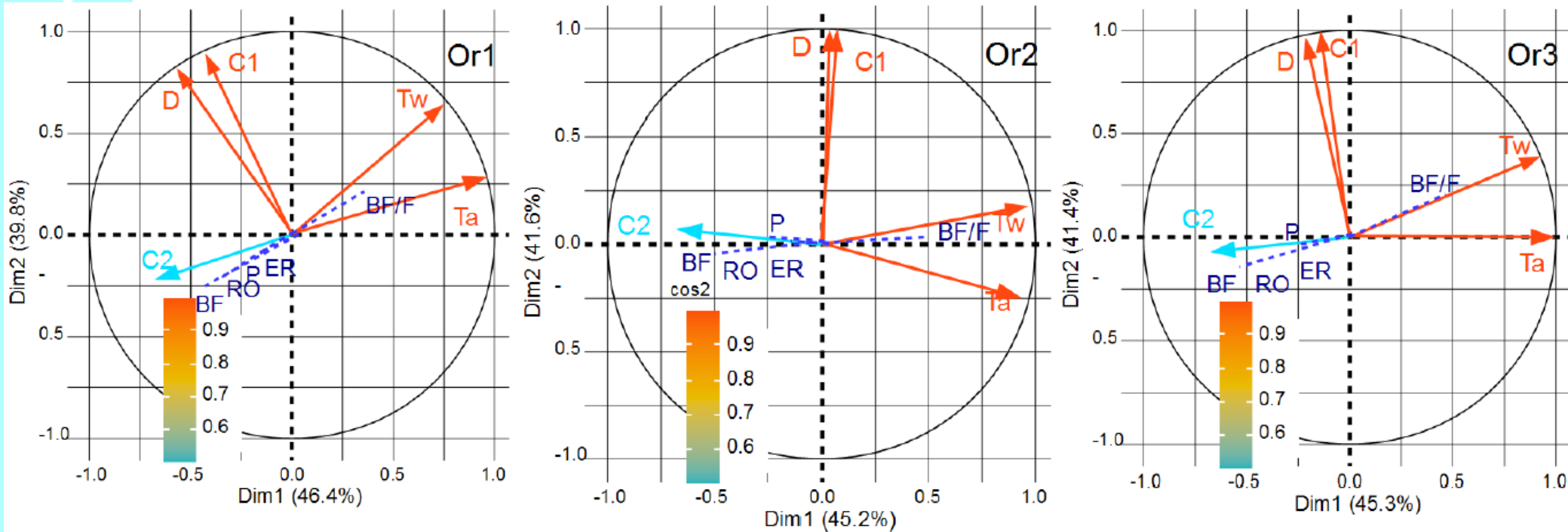


PRÉFET DE LA RÉGION NORMANDIE
Sources : IGN, BD Carthage, BD Topo, DREAL Normandie
Production : le 21/08/2020
DREAL Normandie

Eaux souterraines et eaux aquatiques



ACP portant sur les composantes 1 et 2 de l'ACI de la différence entre Tw et Ta : l'Orne



C1 est indépendante de la Ta

D est principalement expliqué par C1

C2 est située dans un pôle regroupant ruissellement, débit de base et piézométrie

En l'état des connaissances, le rôle de la nappe sur la température de l'Orne n'est pas identifié

Sommaire de la présentation

I. Introduction

II. Caractéristiques du territoire étudié et le réseau de suivi thermique

III. Outils et résultats statistiques

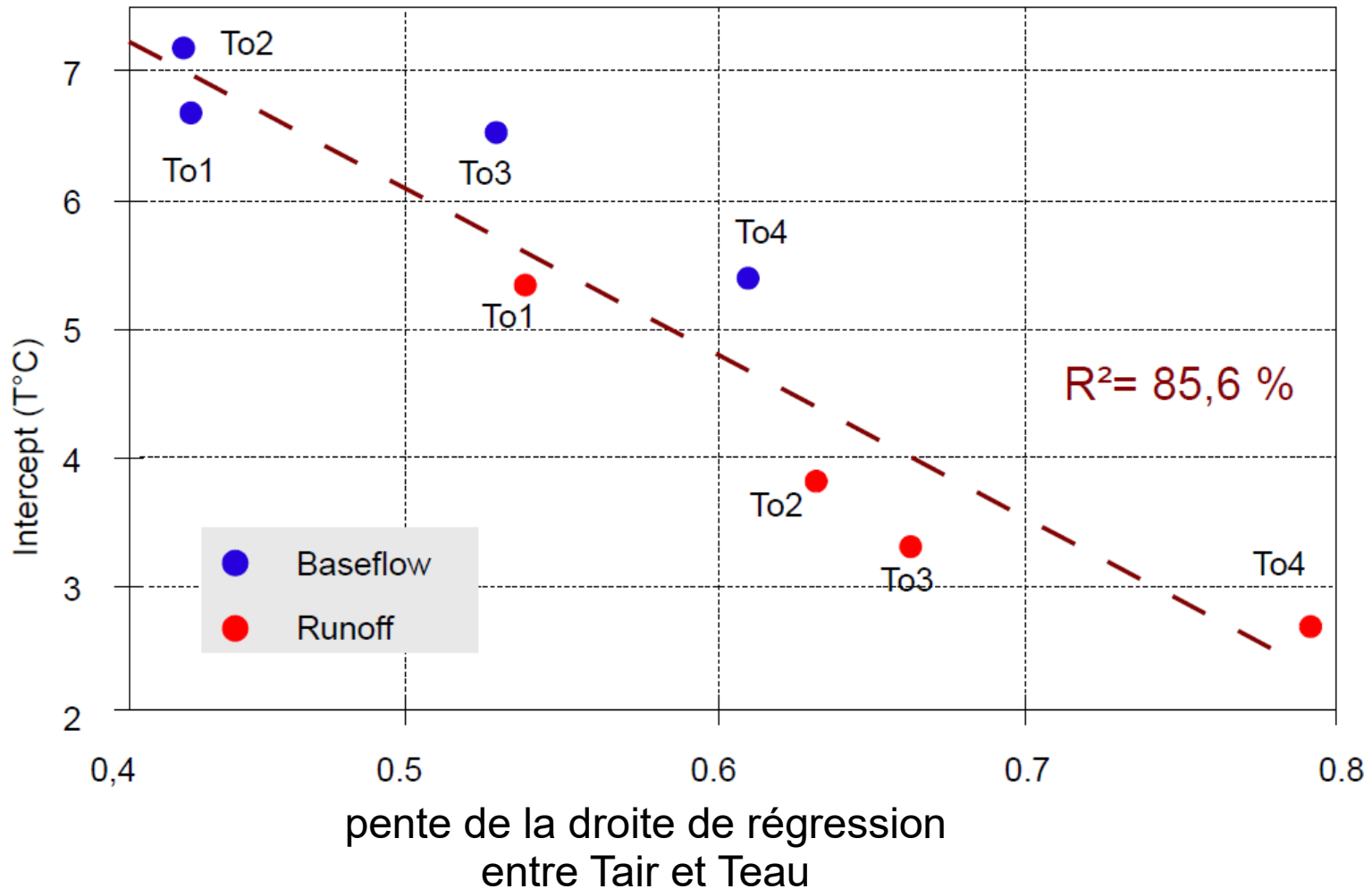
- Corrélation entre la température de l'eau et de l'air
- L'analyse en composante indépendante
 - sur chroniques T_w brutes
 - sur chroniques des différences $T_w - T_a$
- L'analyse en composante principale

IV. Incidence respective des eaux issus du ruissellement et de la nappe dans la thermie de la Touques

V. Conclusions et perspectives

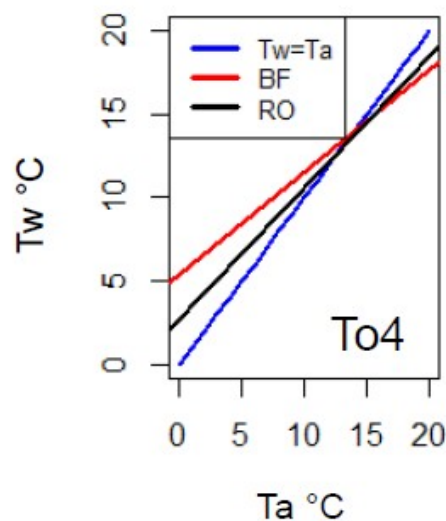
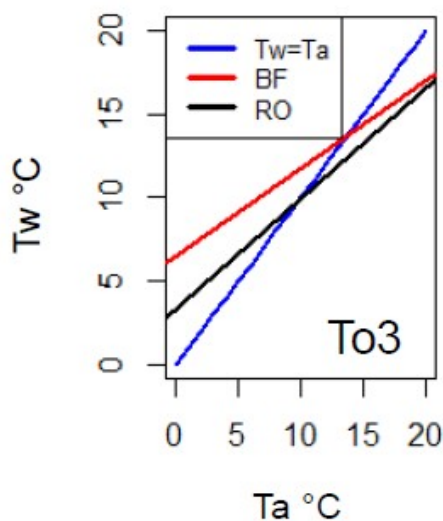
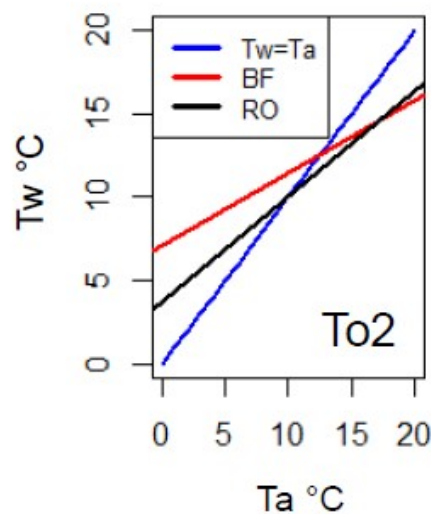
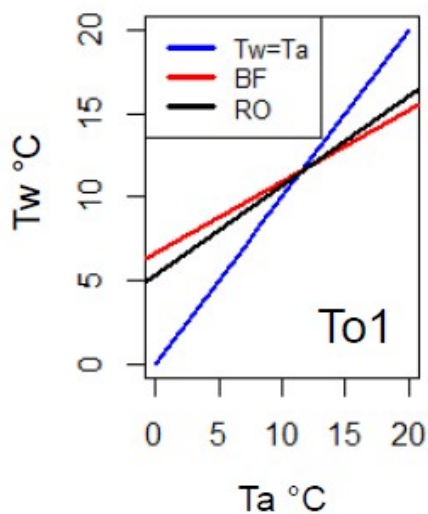
Ré-écriture du diagramme de O'Driscoll en dissociant par modélisation les écoulements d'origine aquifère de ceux issus du ruissellement

Teau quand
 $T_{air} = 0$



Quelle que soit l'origine de l'eau (nappe ou ruissellement), la T_w et la corrélation entre T_a et T_w augmentent d'amont en aval
 T_w nappe est plus élevée que T_w ruissellement à l'intercept

Le modèle séparatif : résultats et interprétation



En To1, près des sources de la Touques, quand la température de l'air et de l'eau sont identiques (point d'équilibre), la T_w (BF) est proche de 11°C . N'ayant que peu échangé avec l'atmosphère, on peut considérer que la température des eaux issues de la nappe est très proche de celle de la nappe. Ce qui est le cas.

Le ruissellement et la nappe contribuent à réchauffer le cours d'eau en To1 avant que $T_w = T_a$ et à la refroidir après

En To2 et To3, on a des moments où le ruissellement réchauffe les eaux pendant que la nappe les refroidit et vice versa

Sommaire de la présentation

I. Introduction

II. Caractéristiques du territoire étudié et le réseau de suivi thermique

III. Outils et résultats statistiques

- Corrélation entre la température de l'eau et de l'air
- L'analyse en composante indépendante
 - sur chroniques T_w brutes
 - sur chroniques des différences $T_w - T_a$
- L'analyse en composante principale

IV. Incidence respective des eaux issus du ruissellement et de la nappe dans la thermie de la Touques

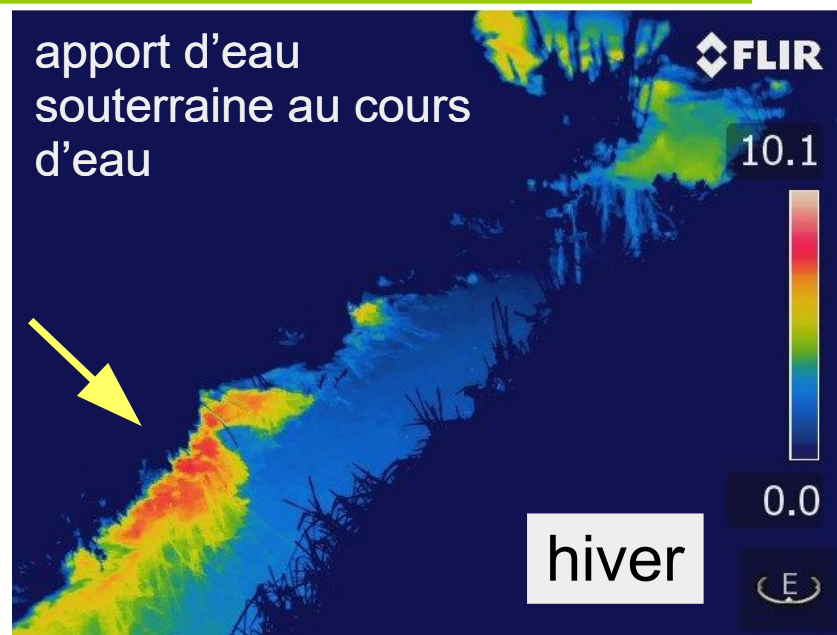
V. Conclusions et perspectives

Conclusions et perspectives

- Les chroniques de température sont des signaux complexes
- Une combinaison d'outils statistiques, support de l'analyse
- Des outils performants lorsque le réseau est bien organisé
- Restructuration du réseau de suivi à prévoir
- Poursuivre les travaux de modélisation
- Collaboration entre différents organismes et « sachants »
- Cerner l'impact du changement climatique
- Déterminer les aménagements en mesure d'en limiter les impacts

Diagnostiquer les apports de la nappe dans un cours d'eau : le projet QUAE

utiliser d'autres outils



les thermographies

source: USGS/Martin Briggs. Public domain.

Diagnostiquer les apports de la nappe dans un cours d'eau : le projet QUAE

utiliser d'autres outils : les thermographies aériennes



avion, hélicoptère ou drone

Diagnostiquer les apports de la nappe dans un cours d'eau : le projet QUAE utiliser d'autres outils

La fibre optique



utilisé dans des bassins versants expérimentaux

méthode en voie de perfectionnement

Voir travaux de l'OSUR (Olivier Bour)

suivi des anomalies de température dans un cours d'eau

équipement d'un cours d'eau en fibre optique : mesurer à haute fréquence la température et évaluer les flux souterrains