



BRGM

MINISTERE DE L'INDUSTRIE ET DE LA RECHERCHE

LA DURETE DES EAUX DE LA
REGION CENTRE
(UTILISATIONS - TRAITEMENTS)

par

Annick SAMSON

74 SGN 260 AME

décembre 1974

BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES
SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL
B.P. 6009 - 45018 ORLEANS CEDEX - Tél. : (38) 66.06.60

DEPARTEMENT GEOLOGIE DE L'AMENAGEMENT
SERVICE HYDROGEOLOGIE
B.P. 6009
45018 ORLEANS CEDEX

SERVICE GEOLOGIQUE REGIONAL
BASSIN DE PARIS
65, rue du général Leclerc
77170 BRIE COMTE ROBERT

74 SGN 260 AME

décembre 1974

R E S U M E

Ce rapport présente la carte de la dureté de l'eau souterraine de la région Centre réalisée à 1/500.000.

En fait, deux cartes sont présentées : l'une donne la dureté de l'eau des différentes nappes superficielles (carte analytique), l'autre fait une synthèse des différentes valeurs de la dureté (carte synthétique). A ces cartes s'ajoutent des cartes annexes présentant la dureté de l'eau des nappes captives utilisées.

La carte synthétique basée uniquement sur les valeurs de la dureté de l'eau, met en évidence quatre zones : l'une correspond à une dureté inférieure à 15°F (liée aux aquifères sablo-argileux et cristallins ou cristallophylliens) ; une deuxième zone correspond à une dureté comprise entre 15 et 25°F (liée aux réservoirs aquifères de la craie, des tuffeaux, des calcaires lacustres du Berry et de Beauce pro-parte) ; une troisième zone correspond à une dureté supérieure à 25°F (liée aux aquifères calcaires jurassiques et aux calcaires de Beauce dans la partie centrale de l'aquifère) ; enfin la quatrième zone correspond à des valeurs très dispersées de la dureté (10-35°F), cet état de fait est dû aux nappes alluviales dont la dureté de l'eau est extrêmement variable d'une part, et à une mauvaise individualisation des nappes d'eau souterraine dans le Lias et le Trias d'autre part.

Un rappel des normes de potabilité et des valeurs limites de la dureté tolérée par les industries suit la notice explicative des cartes.

Ce rapport s'inscrit dans le cadre des études générales méthodologiques entreprises par le Département géologie de l'aménagement.

Cette étude a fait l'objet d'un Diplôme d'Etude Approfondie présenté en 1974 à la Faculté des Sciences d'Orléans - Laboratoire de géologie appliquée.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

GENERALITES

1. Définition de la dureté d'une eau
2. Equivalence entre les unités adoptées dans divers pays
3. Classification des eaux naturelles
4. Quelques méthodes de détermination de la dureté totale

1 - CARTE ANALYTIQUE

2 - CARTE SYNTHETIQUE

3 - NORMES D'UTILISATION DES EAUX SELON LA DURETE

3.1. Les eaux de distribution

3.2. Les eaux utilisées dans l'industrie

3.2.1. Limites de tolérance pour les eaux de chaudières

3.2.2. Teneurs limites recommandées pour les eaux industrielles

3.3. Les eaux pour les usages agricoles

4 - QUELQUES PROCEDES D'ADOUCCISSEMENT

4.1. Procédé chaux-soude

4.2. Procédé au phosphate de soude

4.3. Echangeurs d'ions

5 - PROCEDES DE LUTTE CONTRE L'ENTARTRAGE

CARTES

Figure 1 : Carte de la dureté des eaux souterraines de la région Centre.
Carte analytique.

Figure 2 : Carte de la dureté des eaux souterraines de la région Centre.
Répartition géographique de la dureté de l'eau de la
nappe des calcaires de Beauce.

Figure 3 : Carte de la dureté des eaux souterraines de la région Centre.
Nappe des sables cénomaniens.

Figure 4 : Carte de la dureté des eaux souterraines de la région Centre.
Nappe des sables verts albiens.

Figure 5 : Carte de la dureté des eaux souterraines de la région Centre.
Carte synthétique.

INTRODUCTION

La région Centre couvre la partie méridionale du Bassin de Paris ; elle comprend les départements suivants : Cher, Eure et Loir, Indre, Indre et Loire, Loir et Cher, Loiret. Elle est axée essentiellement sur le bassin de la Loire ; seule la partie Nord-Est est drainée par le bassin de la Seine.

C'est une région privilégiée, riche en réservoirs aquifères dans l'ensemble de sa surface ; seule la bordure du Massif Central est constituée de réseaux aquifères discontinus et complexes.

Les principaux réservoirs aquifères sont les suivants :

- le réservoir aquifère des calcaires de Beauce contient la nappe phréatique la plus étendue de France. Le volume de la réserve est voisin de 10 milliards de m³ ; l'alimentation est de l'ordre de 1 milliard de m³ par an. Au Nord de la Loire, la nappe est rendue extrêmement complexe par les différents réservoirs aquifères qui la contiennent et qui sont à distinguer :
 - l'aquifère du calcaire de Beauce supérieur (calcaire de l'Orléanais ou de Pithiviers) : Aquitanien supérieur ;
 - la molasse du Gâtinais : Aquitanien inférieur ;
 - l'aquifère des calcaires d'Etampes ou calcaires du Gâtinais, encore appelé calcaires de Beauce inférieur : Stampien supérieur.

Au Sud de la Loire, les formations du calcaire de Beauce (s.l.) renferment une nappe captive sous les formations argilo-sableuses de Sologne burdigaliennes.

- les réservoirs aquifères de la craie et des tuffeaux : ils forment une auréole continue autour des formations tertiaires. Ils comprennent le Drouais, le Thimerais, le Chartrain, le Dunois, le Vendômois, le Blésois, la Touraine, le Sancerrois, le Gâtinais (Est). Ils sont très étendus, à nappes libres.
- les réservoirs aquifères des sables cénomaniens et albiens : les nappes contenues dans ces aquifères sont libres aux aires d'affleurement très réduites (sables du Perche et sables de Vierzon cénomaniens, sables albiens au Sud-Est de la Sologne : sables verts de l'Albien inférieur, sables de la Puisaye de l'Albien moyen). Elles sont captives sur la presque totalité de la région. La nappe des sables cénomaniens est très sollicitée essentiellement en Touraine ; la nappe des sables albiens l'est moins dans l'ensemble de la région.

- les aquifères des calcaires jurassiques du Berry sont constitués essentiellement par les calcaires lithographiques et lusitaniens du Malm et par les calcaires oolithiques du Dogger. Bien karstifiés, ils constituent une réserve importante.

- d'autres réservoirs aquifères locaux participent à l'alimentation en eau de la région Centre. Il s'agit des calcaires lacustres ludiens du Berry, sarnoisien de Touraine, à nappes perchées, des formations sablo-argileuses burdigaliennes de la Sologne et de la Forêt d'Orléans, bartoniennes de la Brenne, à nappes locales suspendues, et enfin des alluvions de la Loire.

GENERALITES

1. Définition de la dureté d'une eau

Il y a plusieurs siècles que la notion de dureté d'une eau a été pressentie du fait de son comportement vis à vis des savons.

"La dureté d'une eau est sa propriété de requérir une quantité de savon supérieure à celle exigée par une eau distillée pour former par agitation une mousse persistante". (CEBEDEAU, 1964, 12).

En fait, la dureté d'une eau est due à la présence de sels de calcium et de magnésium (qui décomposent les savons alcalins en donnant lieu à la précipitation de savons insolubles) ; d'autres éléments tels que le fer, le manganèse, l'aluminium, le baryum, le strontium, modifient la dureté lorsqu'ils se trouvent à de fortes concentrations, mais dans une eau normalement minéralisée, ils sont à incriminer à un moindre degré.

Pour la réalisation de cette carte, seule la dureté totale a été utilisée ; elle est due à la totalité des sels alcalino-terreux dissous dans l'eau (essentiellement des bicarbonates, des sulfates et des chlorures).

Rappelons pour mémoire que :

- la dureté permanente indique la teneur en sels alcalino-terreux après ébullition d'une demi-heure, c'est-à-dire la teneur en sulfates et chlorures de Ca et de Mg (après transformation du bicarbonate en carbonate qui précipite et en gaz carbonique libre qui disparaît).
- la dureté temporaire correspond à la teneur en carbonates et bicarbonates de Ca et de Mg.
- la dureté totale est la somme de la dureté permanente et de la dureté temporaire.

La dureté d'une eau est exprimée soit en ppm, soit en milliéquivalents, soit en degrés français. Cette dernière unité de mesure est de loin la plus utilisée.

Un degré français correspond à 10 mg de carbonate de calcium ou à 4 mg de magnésium par litre d'eau. Il correspond également à 0,2 milliéquivalent par litre d'eau, donc 1 milliéquivalent = 5 degrés français.

La dureté est exprimée en abrégé par :

- soit TH = titre hydrotimétrique
- soit dH = degré hydrotimétrique.

2. Equivalence entre les unités adoptées dans divers pays

La dureté étant exprimée différemment dans les pays étrangers, il est utile de préciser les équivalences entre les unités en vigueur dans les divers pays.

Aux Etats-Unis, on emploie l'équivalent par million (epm) :

$$1 \text{ epm} = 50 \text{ mg/l CaCO}_3 = 5^\circ\text{F}$$

$$1 \text{ epm} = 1 \text{ milliéquivalent (mé)}$$

En Allemagne : 1 degré allemand correspond à 0,010 g de Ca O par litre.

En Angleterre : 1 degré anglais équivaut à 1 grain (0,0648 g) de CaCO_3 par gallon impérial (4,5435 l).

Aux Etats-Unis : 1 degré américain équivaut à 1 grain (0,0648 g) de CaCO_3 par gallon américain (3,785 l).

En U.R.S.S. : 1 degré russe correspond à 0,001 g de calcium par litre.

Tableau des degrés de dureté

	ppm CaCO_3	Degrés				
		Anglais	Américain	Français	Allemand	Russe
ppm CaCO_3	1,00	0,07	0,058	0,10	0,056	0,40
degré anglais	14,19	1,00	0,83	1,43	0,80	5,72
degré américain	17,16	1,20	1,00	1,72	0,96	6,86
degré français	10,00	0,70	0,58	1,00	0,56	4,00
degré allemand	17,86	1,25	1,04	1,79	1,00	7,14
degré russe	2,50	0,18	0,15	0,25	0,14	1,00
milliéquivalent	50	3,50	2,90	5	2,80	20,04

Extrait de British Standard for Treatment of Water for Marine Boilers. BS 1170 (1947).

3. Classification des eaux naturelles

Une classification des eaux naturelles est donnée par l'Institut Belge de Normalisation (NBN 304 - 1953) :

Eau	Dureté totale en degrés français
Eau très douce	< 3
Eau douce	3 à 15
Eau dure	15 à 30
Eau très dure	> 30

La classification de Taylor est basée sur la traditionnelle mesure de la dureté par la méthode du savon :

Eau	Dureté totale	
	en ppm CaCO ₃	en degrés français
Eau douce	< 50	< 5
Eau modérément douce	50 à 100	5 à 10
Eau légèrement douce	100 à 150	10 à 15
Eau modérément dure	150 à 250	15 à 25
Eau dure	250 à 350	25 à 35
Eau très dure	> 350	> 35

4. Quelques méthodes de détermination de la dureté totale

4.1. Détermination par calcul

4.1.1. Connaissant la concentration dans l'eau de chaque ion responsable de la dureté, on peut calculer directement celle-ci en multipliant chaque concentration (exprimée en ppm) par un coefficient approprié ; le résultat est exprimé en ppm de CaCO₃.

Cations	Coefficient
Ca	2,497
Mg	4,116
Sr	1,142
Fe	1,792
Al	3,710
Zn	1,531
Mn	1,822

Les éléments Sr, Fe, Al, Zn, Mn ne sont pris en considération que s'ils sont présents en quantité suffisante.

D'une manière générale, pour les eaux normalement minéralisées, la dureté s'exprimera ainsi :

$$\text{Dureté totale} = 2,497 \text{ (Ca)} + 4,116 \text{ (Mg)}$$

ppm CaCO₃ ppm ppm

(Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 1965, 44).

4.1.2. Une deuxième méthode de détermination de la dureté totale par calcul est applicable lorsqu'on connaît la teneur de calcium et de magnésium dans l'eau (en ppm).

On a vu que la dureté est exprimée en ppm de CaCO₃, 1 milliéquivalent CaCO₃ correspondant à 5 degrés français.

$$\begin{aligned} \text{Sachant que : } 1 \text{ mé Ca} &= 20 \text{ ppm} \\ 1 \text{ mé Mg} &= 12 \text{ ppm,} \end{aligned}$$

on obtient la dureté totale :

$$\text{dureté (}^\circ\text{F)} = 5 \left(\frac{\text{Ca}}{20} + \frac{\text{Mg}}{12} \right) = 5 (r \text{ Ca} + r \text{ Mg})$$

{ r signifie ' exprimé en milliéquivalent (mé) }.

4.2. Méthode titrimétrique à l'EDTA

Cette méthode utilise la dissimulation des ions calcium et magnésium par l'acide éthylène diamine tétra-acétique (EDTA).

L'EDTA forme des complexes stables incolores avec les ions Ca et Mg. L'indicateur utilisé est le noir d'Eriochrome T qui, dans un milieu préalablement tamponné à pH 10, forme des complexes colorés avec les ions alcalino-terreux (virage de la solution du rouge au bleu que l'on peut déterminer précisément à l'aide d'un spectro-photomètre).

Remarque : on peut utiliser l'indicateur sous forme de comprimés "tampon indicateur" qui renferment du noir d'Eriochrome T et que l'on dissout dans l'eau à analyser.

(Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 1965, 44).

Cette méthode est très utilisée parce que plus précise et exacte.

4.3. Quelques méthodes moins employées

Une méthode classique : la méthode au savon. Lorsqu'on additionne une liqueur de savon à une eau contenant des sels alcalino-terreux, ces derniers précipitent, et lorsque la précipitation est totale, on voit apparaître en agitant la solution une mousse persistante.

La méthode au palmitate : la palmitate de potassium forme avec les cations Ca et Mg des sels qui précipitent. Le titrage est réalisé en milieu acide en présence de phénolphtaléine qui vire au rose lorsque les sels de Ca et Mg sont précipités (la coloration rose est due à la formation de KOH résultant de l'excès de palmitate de K ajouté).

(Méthode standardisée : (IBN) NBN 304.03 - 1953, (AFNOR) NF.T. 90.003).

La méthode gravimétrique : on calcule la dureté à partir des dosages gravimétriques du calcium et du magnésium (Normes France AFNOR, NF.T. 90.003).

Déterminations automatiques : un échantillon d'eau est prélevé à intervalles réguliers et additionné d'un réactif permettant la détermination de la dureté par colorimétrie ; la coloration est mesurée par une cellule photoélectrique et enregistrée par un millivoltmètre.

1 - CARTE ANALYTIQUE (figure 1)

Sur cette carte, les différentes nappes d'eau souterraine ont été plus ou moins individualisées selon qu'elles présentaient ou non des caractères de dureté équivalents, c'est-à-dire si les limites inférieures et supérieures de dureté se correspondaient.

L'énumération qui suit donne les différents terrains aquifères dans lesquels l'eau captée présente une dureté déterminée.

1.1. Dureté inférieure à 10°F

- Sables coquilliers : Vindobonien. Ce sont des sables argileux correspondant aux faluns de Touraine, aux sables de Chatillon sur Loire - Nappes locales peu étendues.
- Sables et argiles de Sologne : Burdigalien (non cartographiés car non utilisés).
- Pour mémoire, on peut citer les calcaires de Beauce supérieurs (faciès Blamont).
- Calcaires et marnes lacustres : Sarnoisien, Calcaire lacustre de Touraine où la circulation se fait essentiellement par karst. (En l'absence de karst, la dureté demeure inférieure à 20°F).
- Argiles à silex, qui peuvent contenir une nappe. Recouvrent la majeure partie des affleurements de la craie.
- Sables cénomaniens : sables du Perche, sables de Vierzon - Nappes libres ou sous une couverture d'argile à silex.
- Sables de la Puisaye : Albien moyen - Nappe libre.
- Sables verts : Albien inférieur - Nappe libre.
- Sables du Barrémien supérieur et du Valanginien : nappe libre.
- Formations cristalloylliennes et cristallines de la bordure nord du Massif Central.

1.2. Dureté comprise entre 5° et 25°F (cartes annexes - figures 3 et 4)

- Sables cénomaniens : Nappe captive sous les marnes à Ostracées du Cénomaniens supérieur. Les valeurs proches de 20°F traduisent une fermeture insuffisante des réservoirs aquifère supérieur et inférieur (craie, calcaire jurassique) - (figure 3).
- Nappe des sables verts : Albien inférieur - Nappe captive étendue sous les argiles de l'Albien moyen ou supérieur. (figure 4).

1.3. Dureté comprise entre 10° et 20°F

- Nappe du calcaire de Beauce sous la Sologne : Il s'agit d'une eau peu minéralisée ; cette faible minéralisation s'explique par une alimentation de la nappe par drainance à partir de la nappe du Burdigalien sus-jacente dont la dureté n'excède pas 10°F.

1.4. Dureté comprise entre 15° et 25°F

- Tuffeau : Turonien. En Touraine uniquement. Nappe étendue prolongeant la nappe de la craie.
Le tuffeau recouvert d'argile à silex, présente généralement une dureté inférieure à 15°F.
- Pliocène : sables et argiles du Boishaut : Nappes discontinues.

1.5. Dureté comprise entre 15° et 30°F

- La craie : Sénonien - Turonien : recouverte au Nord et à l'Ouest par l'argile à silex pouvant renfermer une nappe en relation avec les eaux de la craie. Les infiltrations à travers l'argile à silex ou les circulations à travers un réseau karstique classent ces valeurs à 15° - 25°F.
- Pour mémoire, on peut citer la Molasse du Gâtinais : Aquitanien inférieur (18°-27°F).
- Calcaires ludiens : calcaires du Berry, calcaire de Briare.

1.6. Dureté comprise entre 25° et 35°F

- Nappes alluviales et nappes complexes du Lias et du Trias. Les valeurs très dispersées de la dureté des eaux des nappes alluviales et des eaux des nappes peu individualisées du Lias et du Trias, nous ont contraint à utiliser une fourchette dont les bornes supérieures et inférieures sont très éloignées.

- Formations alluviales : les résultats sont très hétérogènes. Les eaux en charge dans les aquifères coexistants et les apports latéraux peuvent modifier la dureté des eaux de la nappe alluviale.

- Formations liasiques et triasiques : le Lias "indifférencié" se compose de calcaires, marnes, grès argilo-calcaires, sables. Le Trias "indifférencié" est représenté par des marnes et dolomies (Keuper), des argiles, grès et arkoses bariolés, des marnes bariolées avec lentilles de gypse. Selon la localisation de la nappe, la dureté de l'eau est extrêmement variable : faible dans les grès, extrêmement élevée (supérieure à 35°) dans les dolomies ou au contact du gypse.

1.8. Dureté comprise entre 20° et 40°F

Cette rubrique correspond au calcaire de Beauce (s.l.) : calcaire de Beauce supérieur, calcaire de Beauce inférieur séparés par la Molasse du Gâtinais.

Une carte annexe analyse cette zone : "Carte de la répartition géographique de la dureté de l'eau de la nappe des calcaires de Beauce" (figure 2).

On constate que la dureté de l'eau de la nappe de Beauce est plus importante dans la zone centrale, où la hauteur mouillée est plus importante et la nappe plus profonde, que sur ses bordures.

Un minimum de dureté (comprise entre 20° et 25°) est constaté dans le Gâtinais où la nappe est captive et drainée à partir de la nappe du Burdigalien sus-jacente dont la dureté de l'eau est inférieure à 10°, dans la partie de l'aquifère au Nord-Ouest de la Loire (zone occidentale de Beaugency, Patay, Orgères en Beauce), dans la zone de Malesherbes, et dans la zone orientale en bordure du Loing.

Un maximum de dureté (supérieure à 30°) est relevé dans la Forêt d'Orléans, ce qui peut s'expliquer par un enrichissement en sels dissous directement à partir de la surface par l'intermédiaire de gouffres et de bétoires nombreux dans cette zone.

Enfin, on trouve des valeurs intermédiaires (comprises entre 25 et 30°) de la dureté de l'eau, dans la partie centrale de l'aquifère : zones de Méreville, de Neuville-aux-Bois, de Pithiviers, de Ingré-Chevilly. (DESPREZ N., MEGNIEN C., 1973, 15).

1.9. Dureté supérieure à 30°F

- Calcaires lithographiques du Portlandien, calcaires à Astarte du Séquanien ; calcaires lusitaniens. Les valeurs de la dureté sont abaissées quand la circulation se fait par réseau karstique. La dureté est légèrement inférieure à 30°F (comprise essentiellement entre 26° et 30°F) dans les eaux des marnes et marno-calcaires kimméridgiens.

2 - CARTE SYNTHETIQUE (figure 5)

Connaissant les valeurs extrêmes de la dureté des eaux des différentes nappes souterraines, une carte synthétique a été réalisée afin de donner une vue d'ensemble de la dureté de l'eau de la région. Les coupures les plus représentatives ont été adoptées, soit :

- valeurs inférieures à 15°F : correspondant aux nappes citées au paragraphe 1.1. traitant des sables et calcaires tertiaires, des sables crétacés et des formations cristallines et cristallophylliennes du Massif-Central.
- valeurs comprises entre 15 et 25°F : elles correspondent aux eaux de la nappe de la craie (à quelques exceptions près car certaines valeurs correspondant aux zones où la craie n'est pas recouverte d'argile à silex excèdent 25°F), aux eaux du tuffeau, des calcaires lacustres du Berry, du Pliocène, du calcaire de Beauce sur ses bordures et sous la Sologne.
- valeurs supérieures à 25°F : elles correspondent aux calcaires jurassiques (Dogger et Malm) et au calcaire de Beauce dans sa partie centrale. Une coupure nette ne peut être rigoureusement faite entre les différentes valeurs de la dureté des eaux du calcaire de Beauce, une superposition des figurés a donc été utilisée.
- valeurs comprises entre 10 et 35°F : il s'agit des valeurs disparates de la dureté des eaux des alluvions et des formations du Lias et du Trias.

Sur cette carte synthétique, on a représenté la dureté des eaux superficielles à l'étiage (extrait de "l'Inventaire de degré de pollution des eaux superficielles - Annexe cartographique - Campagne 1971", 32).

En effet, à l'étiage, la composition chimique des eaux des cours d'eau est susceptible de refléter la composition chimique de l'eau de la nappe qui les alimente.

Ainsi on constate une parfaite corrélation lorsque le cours d'eau est alimenté par une même nappe : c'est le cas notamment des cours d'eau alimentés par la nappe de la craie (l'Eure, l'Avre, le Loir, le Loing, la Brenne, l'Indre en aval, la Vienne en aval), par la nappe du calcaire de Beauce (l'Essonne), par les eaux du réseau aquifère des calcaires du Malm (l'Yèvre), par les eaux des formations cristallines et cristallophylliennes (la Creuse et la petite Creuse).

Lorsque le cours d'eau traverse différentes formations renfermant autant de nappes diverses, la corrélation ne peut se faire car les eaux des cours d'eau résultent d'un mélange d'eau de qualité différente. C'est le cas notamment de la Loire, du Cher, de l'Indre en amont, de la Creuse dans son cours moyen.

3 - NORMES D'UTILISATION DES EAUX SELON LA DURETE

Les eaux utilisées pour la consommation humaine doivent en principe obéir aux normes définies par l'Organisation Mondiale de la Santé ou par chaque pays.

Dans l'industrie, la dureté fait sentir son influence néfaste si les teneurs limites recommandées sont dépassées.

3.1. Les eaux de distribution

Les normes internationales préconisées par l'O.M.S. (1965) sont les suivantes :

	Concentration maximale acceptable - mg/l	Concentration maximale admissible - mg/l
Ca	75	200
Mg	60	150

Les normes françaises (J.O. n° 74 - Mars 1962) précisent que la dureté tolérable pour les eaux d'adduction collective doit être inférieure à 30°F, le degré optimum paraissant s'établir aux environs de 12 à 15°F.

En fait, ces normes n'indiquent que les limites supérieures qu'il est désirable de ne pas dépasser ; la dureté de l'eau pour la consommation ne fait pas l'objet de prescriptions rigides.

L'influence de la dureté de l'eau sur la santé publique a donné matière à de nombreuses polémiques, les uns lui attribuant une influence bénéfique sur la réduction des caries dentaires, d'autres énonçant qu'elle est à l'origine de calculs rénaux.

Le magnésium, qui entre pour une grande part dans la dureté, a une grande importance biologique, car il joue un rôle dans la constitution des os et il intervient dans certains systèmes enzymatiques et dans la biogénèse de certaines hormones. Cependant une eau trop riche en magnésium provoque des troubles dus aux propriétés laxatives du magnésium.

Enfin, on a constaté récemment que la consommation d'eau trop douce favoriserait les maladies cardio-vasculaires (études statistiques entreprises au Japon, aux U.S.A., Grande-Bretagne et Canada par l'O.M.S.).

D'un point de vue gustatif, il semblerait qu'une eau titrant 30°F serait plus agréable à boire, sauf si elle contient trop de magnésium, lequel donne à l'eau une saveur amère.

La minéralisation de l'eau a une influence sur la saveur des aliments.

Du point de vue des usages domestiques, l'eau dure augmente la temps de cuisson des légumes par formation de pectates insolubles ; on lui attribue également une perte d'acides ascorbitiques lors de la cuisson de certains féculents.

3.2. Les eaux utilisées dans l'industrie

Une nuisance générale provoquée par l'eau dure est l'entartrage ; les exemples les plus communs sont le colmatage des chauffe-eau ménagers, l'entartrage des radiateurs, chaudières, tuyaux, circuits de réfrigération, freinant la circulation de l'eau, ralentissant les échanges calorifiques, et par suite diminuant le rendement thermique de la chaudière et celui de la réfrigération. On estime qu'un voile de tartre de 6 mm d'épaisseur provoque une perte calorifique de 40 % (la consommation supplémentaire d'énergie est estimée à 6-8% par mm de tartre).

3.2.1. Les limites de tolérance pour les eaux de chaudières

Pression - bar	0 - 10	10 - 17	17 - 28	>28
Dureté totale - degrés français -	8	4	1	0,2

3.2.2. Teneurs limites recommandées pour les eaux industrielles

(Water Quality Criteria - 1971, 46).

- Sucreries	Ca	20 ppm
	Mg	10 ppm
	TH	30°F
- Industries laitières	TH	18°F
- Brasseries	TH	50°F
- Industries de l'alimentation		
. Denrées alimentaires : lavage	TH	1°F
. Denrées alimentaires : fabrication	TH	1 à 25°F
. Conserveries en général	TH	5 à 8,5°F
. Conserveries de légumes	TH	2,5 à 7,5°F
. Conserveries fruits et végétaux	TH	10 à 20°F
. Conserveries petits pois	TH	20 à 40°F
. Boissons carbonatées	TH	20 à 28°F
jus de fruits		
. Glace artificielle	TH	7 à 7,2 °F
. Eaux de refroidissement	TH	5°F
- Photographie	TH	10°F
(eau très douce pour l'émulsionnage)		
- Industries textiles		
. Textiles	TH	0 à 5°F
. Viscose rayonne fibre	TH	8°F
- Industries diverses		
. Buanderies	TH	0 à 5°F
. Laveries de laine	TH	0 à 5°F
. Tanneries	TH	5 à 51°F
- Papeteries (pulpe et fabrication papier)		
. En général	TH	10 à 20°F
. Pulpe de bois	TH	20°F
. Pulpe sodée	TH	10°F
. Pulpe kraft blanchie	TH	10°F
. Pulpe kraft non blanchie	TH	10°F
. Pulpe pour papier fin	TH	10°F
- Industries sidérurgiques	TH	5°F
- Caoutchouc synthétique	TH	5°F

./.

- Construction - Béton

Aucune influence de la dureté pendant la préparation du mélange (sauf abondance de sulfates provoquant le gonflement du béton par formation de sulfo-aluminate de calcaire expansif).

La présence de calcium dans l'eau est parfois avantageuse quand il convient de provoquer un léger dépôt de carbonates (dureté temporaire) sur les conduites métalliques pour les protéger de la corrosion.

3.3. Les eaux pour les usages agricoles

Les eaux d'irrigation doivent être adaptées aux cultures, c'est-à-dire qu'elles ne doivent pas contenir d'ions néfastes aux végétaux.

Le calcium est un élément essentiel de la croissance végétale. Il joue également un rôle très important dans le sol car il est responsable de la formation de complexes argilo-humiques.

L'effet du magnésium dans la croissance végétale est comparable à celui du calcium lorsque le rapport Mg/K ou Na est voisin de 1.

4 - QUELQUES PROCÉDES D'ADOUCCISSEMENT

L'adoucissement d'une eau consiste à baisser le degré hydrotimétrique en éliminant totalement ou partiellement les sels de calcium et de magnésium.

Pour les eaux d'alimentation, la dureté que l'on cherche à atteindre est de 12 à 15°F ; pour les eaux de chaudières, la dureté résiduelle doit être pratiquement nulle (0-2°F).

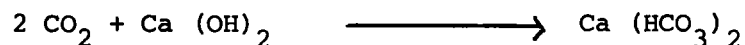
4.1. Procédé chaux-soude

Ce procédé consiste à convertir les sels de calcium et de magnésium solubles en sels insolubles qui pourront être éliminés. L'utilisation de la chaux intéresse la dureté carbonatée, et l'utilisation de la soude intéresse la dureté permanente (chlorures et sulfates).

Pour les eaux d'alimentation, le traitement se fait à froid car une dureté de 12 à 15°F est demandée (rarement moins) ; pour les eaux de chaudières, le traitement se fait à chaud, les eaux devant être très douces (la solubilité du carbonate de calcium décroît avec la température).

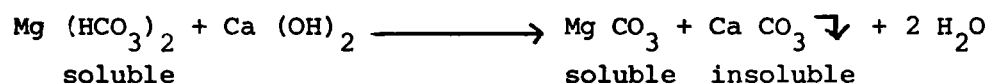
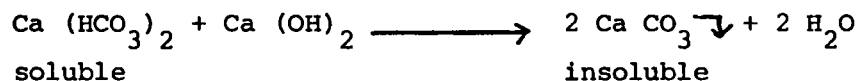
Le procédé d'adoucissement chaux-soude est basé sur les réactions suivantes :

1. Elimination de l'anhydride carbonique par la chaux :

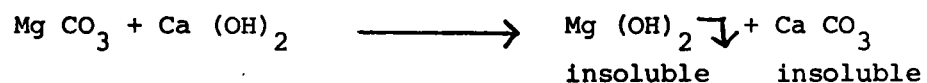


Le bicarbonate formé s'ajoute à la dureté temporaire.

2. Elimination du bicarbonate calcique



3. Elimination de la dureté magnésienne carbonatée et sulfatée



4. Elimination de la dureté non carbonatée par la soude



A l'issue de ce traitement, on a donc assisté à l'élimination de CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{--} , Mg^{2+} et Ca^{2+} d'une part et au remplacement par Na^+ des cations associés à SO_4^{--} et Cl^- d'autre part.

L'épuration peut être stoppée au stade -2- pour les eaux destinées à la consommation.

La valeur de la dureté de l'eau est donc basée sur la solubilité du carbonate de calcium et de l'hydroxyde de magnésium. La solubilité du carbonate décroît avec la température ; on utilise donc un procédé d'adoucissement à chaud (100°C et plus) pour les eaux destinées à l'alimentation des chaudières.

4.2. Procédé au phosphate de soude

Ce procédé, très coûteux, n'est employé que comme complément du procédé chaux-soude ou pour traiter des eaux naturellement douces ; il permet d'amener la dureté à 0,5°F voire à 0°F. Le principe est de convertir les sels de calcium et les sels de magnésium solubles en phosphates calciques et magnésiens insolubles.

4.3. Echangeurs d'ions

L'adoucissement en cycle Na est réalisé en faisant passer l'eau au travers d'un échangeur d'ions (tel que les glauconies, silicates ou aluminates de sodium, matières carbonatées non siliceuses, ou résidus cationiques), les sels de calcium et de magnésium étant convertis en sels sodiques. Cette méthode abaissant la dureté à 7-8°F, est utilisée pour les eaux destinées aux usages publics.

La déminéralisation en cycle H : on utilise des charbons sulfonés, des résidus phénol-formol sulfonés, ou des résidus carboxyliques. Tous les cations sont remplacés par l'ion H^+ .

La combinaison des cycles Na et H convient particulièrement aux eaux destinées à l'industrie.

La déminéralisation par lits successifs utilise une résine cationique suivie d'une résine anionique.

La déminéralisation par lits mélangés élimine simultanément les anions et les cations et permet d'obtenir une déminéralisation aussi complète qu'on le souhaite.

Lorsque la dureté est supérieure à 85-100°F, on traite d'abord l'eau à la chaux, puis à l'aide d'un échangeur d'ions.

5 - PROCEDES DE LUTTE CONTRE L'ENTARTRAGE

Les procédés d'adoucissement d'une eau provoquent la modification chimique de cette eau par élimination partielle ou totale des ions calcium et magnésium.

Si l'utilisateur désire conserver les caractéristiques chimiques de l'eau qui lui est distribuée, il aura à lutter contre les phénomènes d'entartrage si l'eau est dure. Des procédés récents de lutte contre l'entartrage, ne modifiant pas ou peu la composition chimique de l'eau, ont été mis au point.

5.1. Traitements chimiques filmogènes

Ces traitements n'éliminent pas les sels alcalino-terreux contenus dans l'eau, mais ils empêchent leur précipitation, s'opposant ainsi à l'entartrage. Ils forment aussi une pellicule (film) sur les parois du circuit d'eau les protégeant ainsi de l'entartrage et désagrégeant les couches de tartre antérieures.

Ils consistent à faire passer l'eau au travers d'un produit inhibiteur si l'installation est petite, ou à injecter ce produit dans l'eau à l'aide d'un injecteur-doseur si l'installation est plus importante.

Le produit inhibiteur utilisé est le polyphosphate qui présente un inconvénient cependant : il est difficilement biodégradable.

5.2. Traitements physiques

5.2.1. Le conditionnement électromagnétique par induction

Le traitement consiste à soumettre l'eau à l'action de puissants champs magnétiques alternatifs qui modifient la force de cohésion des ions calcium et magnésium dans l'eau et empêchent ainsi leur cristallisation en sels sur les parois des canalisations. Les cristaux qui cristallisent n'ont aucune adhérence et sont éliminés par le courant d'eau.

5.2.2. Le traitement catalytique

L'eau passe à travers une cellule catalytique contenant des éléments diamagnétiques intensifiant le diamagnétisme naturel de l'eau ; l'effet est de disperser les sels calcaires paramagnétiques et de s'opposer à l'entartrage.

5.2.3. L'antitartre électronique

Une électrode produit périodiquement les décharges d'un condensateur dans l'eau ; ces décharges modifient la structure des sels calcaires et provoquent la cristallisation de ces sels sur l'électrode s'opposant ainsi à l'entartrage du circuit d'eau.

BIBLIOGRAPHIE

1. ABRARD R. (1937-1939).- Contribution à l'étude hydrogéologique du Cher.
Ann. Mines, t. XIII, p. 34-35, t. XV, p. 153-164.
2. ABRARD R. (1946).- Aperçu hydrogéologique sur le département du Cher.
Bull. Mus. Nat. Hist. Nat. (2), t. XVIII, n° 2.
3. ALBINET M. (1967).- Carte hydrogéologique du Bassin de Paris (2 feuilles) -
1/500.000.
4. ALBINET M., DESPREZ N., VUILLAUME Y. (1971).- Etude de la qualité chimique
des eaux du Val d'Orléans. *Rapport BRGM, 71 SGN 420 HYD.*
5. ATLAS DES NAPPES SOUTERRAINES DE LA FRANCE.-
6. BIRAIS A., NEAU G., VUILLAUME Y. (1972).- Relation entre lithologie et
potabilité chimique de l'eau souterraine dans le Sancerrois.
Rapport BRGM, 72 SGN 436 AME.
7. BOUILLIN O., DESPREZ N., MONITION L. (1972).- Les eaux souterraines dans la
région Centre. *Assoc. française pour l'Avancement des Sciences -
Orléans-la-Source, juillet 1972.*
8. BOUILLIN O., DESPREZ N., MONITION L. (1973).- Les eaux souterraines dans
la région Centre. *Rapport BRGM, 74 SGN 199 AME.*
9. BOURGUET L., DELAROZIERE-BOUILLIN O., DREYFUS A. (1971).- Etude et carto-
graphie du coût de l'eau souterraine en France. *Rapport BRGM,
71 SGN 226 HYD.*
10. BREMOND R., VUICHARD R. (1973).- Les paramètres de la qualité des eaux.
11. CAUDRON M., DESPREZ N. (1968).- Etude hydrogéologique de la Touraine. Inven-
taire des points d'eau et des ressources hydrauliques des vallées
de la Loire et du Cher en amont de Tours (Indre-et-Loire).
Rapport BRGM, 68 SGL 137 BDP.

12. CEBEDEAU (1964).- Le livre de l'eau. *Volume I, 2nd édition, p. 337-348.*
13. CEBEDEAU (1959).- La dureté de l'eau. Effets, dureté des eaux dans le monde, traitements d'adoucissement. *Vol. II.*
14. CEBEDEAU (1968).- La dureté de l'eau. Composition des eaux d'Europe et d'Afrique, méthodes d'analyses, normes, traitements d'adoucissement.
15. DESPREZ N., MEGNIEN C. (1973).- Hydrogéologie de la Beauce. *Bull. BRGM, Section III, n° 3.*
16. DESPREZ N. (1967).- Etude hydrogéologique des Calcaires de Beauce (Petite Beauce). Inventaire des bassins du Réveillon, de la Houzée, de la Brenne, de la Cisse, de la Tronne, du Lieu et du Ru de Beaugency (Loir-et-Cher, Loiret). *Rapport BRGM, DSGR 67 A7.*
17. DESPREZ N. (1967).- Etude hydrogéologique du Calcaire de Beauce. Inventaire des bassins de la Conie, de l'Aigre et du Ru d'Ecoman - Haute et Basse Beauce. *Rapport BRGM, DSGR 67 A11.*
18. DESPREZ N. (1967).- Inventaire et étude hydrogéologique du Val d'Orléans. *Rapport BRGM, DSGR 67 A21.*
19. DESPREZ N. (1967).- Etude hydrogéologique du Calcaire de Beauce. Inventaire du bassin des Mauves (Loiret). *Rapport BRGM, DSGR 67 A30.*
20. DESPREZ N. (1967).- Etude hydrogéologique du Calcaire de Beauce. Inventaire du bassin versant de la Loire en amont d'Orléans. *Rapport BRGM, DSGR 67 A86.*
21. DESPREZ N., DUPRE J. (1968).- Etude hydrogéologique du Calcaire de Beauce. Inventaire des bassins de la Voise et de la Roguenette (Eure-et-Loir). Extension vers le bassin de l'Orge et de la Juine (Yvelines). *Rapport BRGM, 68 SGL 27 BDP.*

22. DESPREZ N. (1968).- Etude hydrogéologique du Calcaire de Beauce. Inventaire des bassins de la Juine, de l'Essonne et du Loing (Eure-et-Loir, Loiret). Extension dans les départements de l'Essonne et de la Seine-et-Marne). *Rapport BRGM, 68 SGL 68 BDP.*
23. DESPREZ N. (1969).- Etude hydrogéologique de la Touraine. Inventaire des points d'eau et des ressources hydrauliques de l'agglomération de Tours (Indre-et-Loire). *Rapport BRGM, 69 SGL 201 BDP.*
24. DESPREZ N., MARTINS C. (1970).- Hydrogéologie du Calcaire de Beauce sous la Sologne (Loir-et-Cher, Loiret). *Rapport BRGM, 70 SGN 023 BDP.*
25. DESPREZ N., DUPRE J., MARTINS C. (1970).- Etude hydrogéologique de la Touraine. Hydrogéologie du Cénomaniens dans l'Indre-et-Loire. *Rapport BRGM, 70 SGN 169 BDP.*
26. DESPREZ N. (1971).- Etude hydrogéologique des réservoirs aquifères post-cénomaniens dans les régions septentrionales et orientales de la Sologne (Cher, Loir-et-Cher, Loiret). *Rapport BRGM, 71 SGN 256 BDP.*
27. DESPREZ N. (1972).- L'hydrogéologie des formations lacustres en Beauce et en Sologne. Journées sur le Calcaire de Beauce. *C.E.T.E., Blois, 1972.*
28. DIENERT F., LEVY A., MARTIN A.J., MIQUEL P., THIERRY H. (1899-1902).- Les Eaux de l'Avre - Préfecture de la Seine.
29. DUPONT A. (1965).- Etude hydrogéologique locale du gisement aquifère de la craie de la vallée d'Avre en vue de nouveaux captages pour l'alimentation en eau de Paris. *Tech. Sc. Mun., p. Fr., t. LX, n° 7, p. 205-223.*
30. GREFFART J., MONITION L. (1969).- Les données de l'analyse des eaux. *Rapport BRGM, 69 SGL 200 HYD.*
31. GROSSOUVRE V.A. de (1916).- Contribution à l'hydrogéologie des terrains calcaires (Berry). *Bull. Soc. Géol. Fr., p.65.*

32. INVENTAIRE DU DEGRE DE POLLUTION DES EAUX SUPERFICIELLES. Annexe cartographique. Campagne 1971. Environnement.
33. LAUVERTAT J. (1967).- Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de l'Albien dans le centre du Bassin de Paris. *D.E.S., Paris*.
34. LEMAIRE H.R. (1967).- L'alimentation en eau de l'agglomération de Tours. *Terres et eaux, n° 50, p. 29-39*.
35. LEMOINE P., HUMERY R., SOYER R. (1939).- Les forages profonds du Bassin de Paris. Nappe artésienne des sables verts. *Mém. Mus. Nat. Hist. Nat. n° 11*.
36. LORAIN J.H. (1972).- La géologie du Calcaire de Beauce. Journées sur le Calcaire de Beauce. *C.E.T.E., Blois, 1972*.
37. MARGAT J. et al. (1964).- Cartes des nappes d'eau souterraine de la France. 1/1.000.000.
38. MAUVISSEAU J., RENAULT Ph. (1959).- La rivière souterraine d'Orchaise (Loir-et-Cher). *Ann. Spéléo. t. XIV, n° 1-2, p. 81-100*.
39. MEGNIEN C. et al. (1970).- Atlas des nappes aquifères de la région parisienne. Série de cartes à 1/200.000 et 1/500.000.
40. MONITION L. (1969).- Données sur l'utilisation des eaux selon leur qualité chimique. *Rapport BRGM, 69 SGL 121 HYD*.
41. RAMPON G. (1963).- Etat de la documentation sur les ouvrages souterrains implantés sur les feuilles topographiques : Fontainebleau, Château-Landon et synthèse hydrogéologique provisoire. *Rapport BRGM, DSGR 63 A30*.
42. RAMPON G. (1965).- Etat de la documentation sur les ouvrages souterrains implantés sur les feuilles topographiques : Nogent-le-Roi, Rambouillet et synthèse hydrogéologique provisoire. *Rapport BRGM, DSGR 65 A7*.

43. SAMSON A. (1974).- La dureté des eaux souterraines. In : Les eaux souterraines de la région Centre. *Rapport BRGM, 74 SGN 260 AME.*
44. STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. *12e édition, 1965, p. 147-152.*
45. VUILLAUME Y. (1971).- Application des méthodes isotopiques et hydrochimiques à l'étude de la nappe de l'Albien du Bassin de Paris. 101 pages, 50 figures, 24 tableaux. *Rapport BRGM, 71 SGN 304 HYD.*
46. WATER QUALITY CRITERIA - 2e édition - avril 1971.

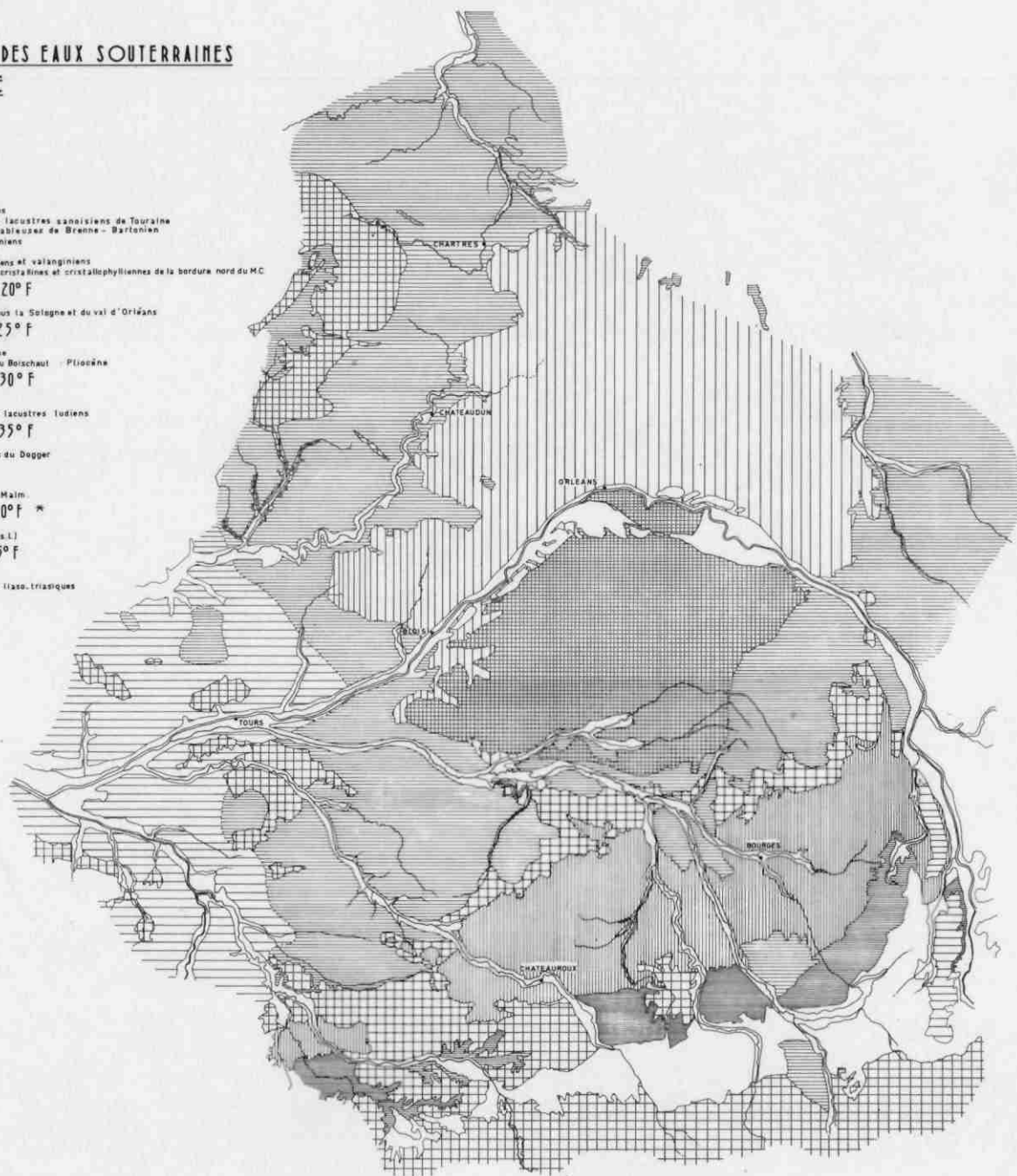
C A R T E S

CARTE DE LA DURETE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA REGION CENTRE

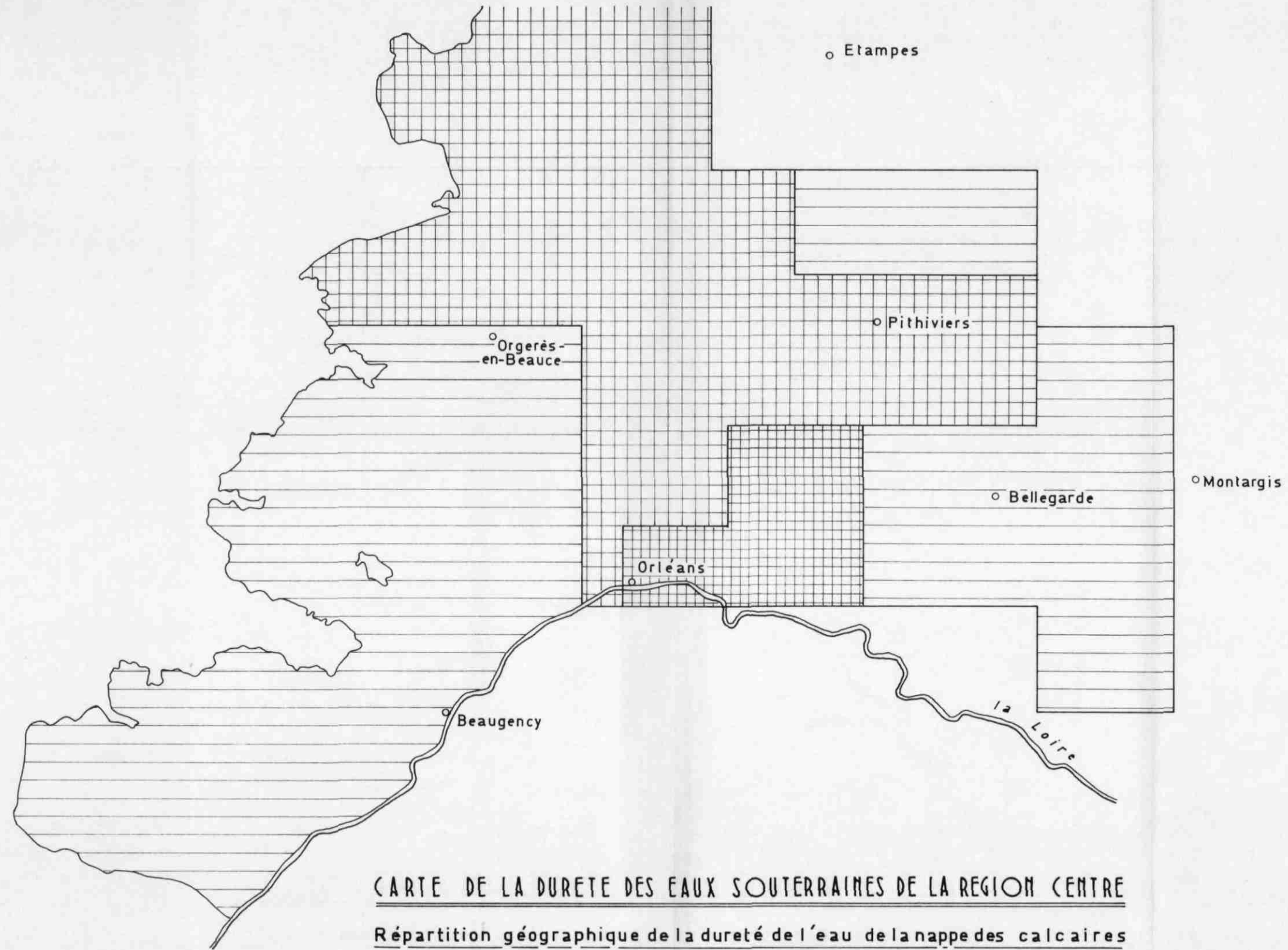
Carte analytique

- Inférieure à 10° F**
 Nappe des sables vindoboniens
 Réseau aquifère des calcaires lacustres santonniens de Touraine
 Nappe de formations argilo-sabieuses de Brema - Bartonien
 Nappe libre des sables cénozoïques
 Nappe libre des sables albiens
 Nappe libre des sables barremiens et valanginiens
 Réseau aquifère des formations cristallines et cristallophylliennes de la bordure nord du M.C.
- Comprise entre 10° F et 20° F**
 Nappe du calcaire de Beauce sous la Sologne et du val d'Orléans
- Comprise entre 15° F et 25° F**
 Nappe de tuffeau de Touraine
 Nappe des sables et argiles du Boischaux - Pliocène
- Comprise entre 15° F et 30° F**
 Nappe de la craie
 Réseau aquifère des calcaires lacustres ludiens
- Comprise entre 25° F et 35° F**
 Réseau aquifère des calcaires du Dogger
- Supérieure à 30° F**
 Réseau aquifère des calcaires du Malm
- Comprise entre 20° F et 40° F ***
 Nappe du calcaire de Beauce (s.l.)
- Comprise entre 10° F et 35° F**
 Nappes alluviales
 Réseau aquifère des formations liaso-triasiques




* Voir carte annexe

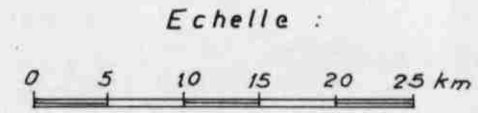


0 5 10 15 20 25 km



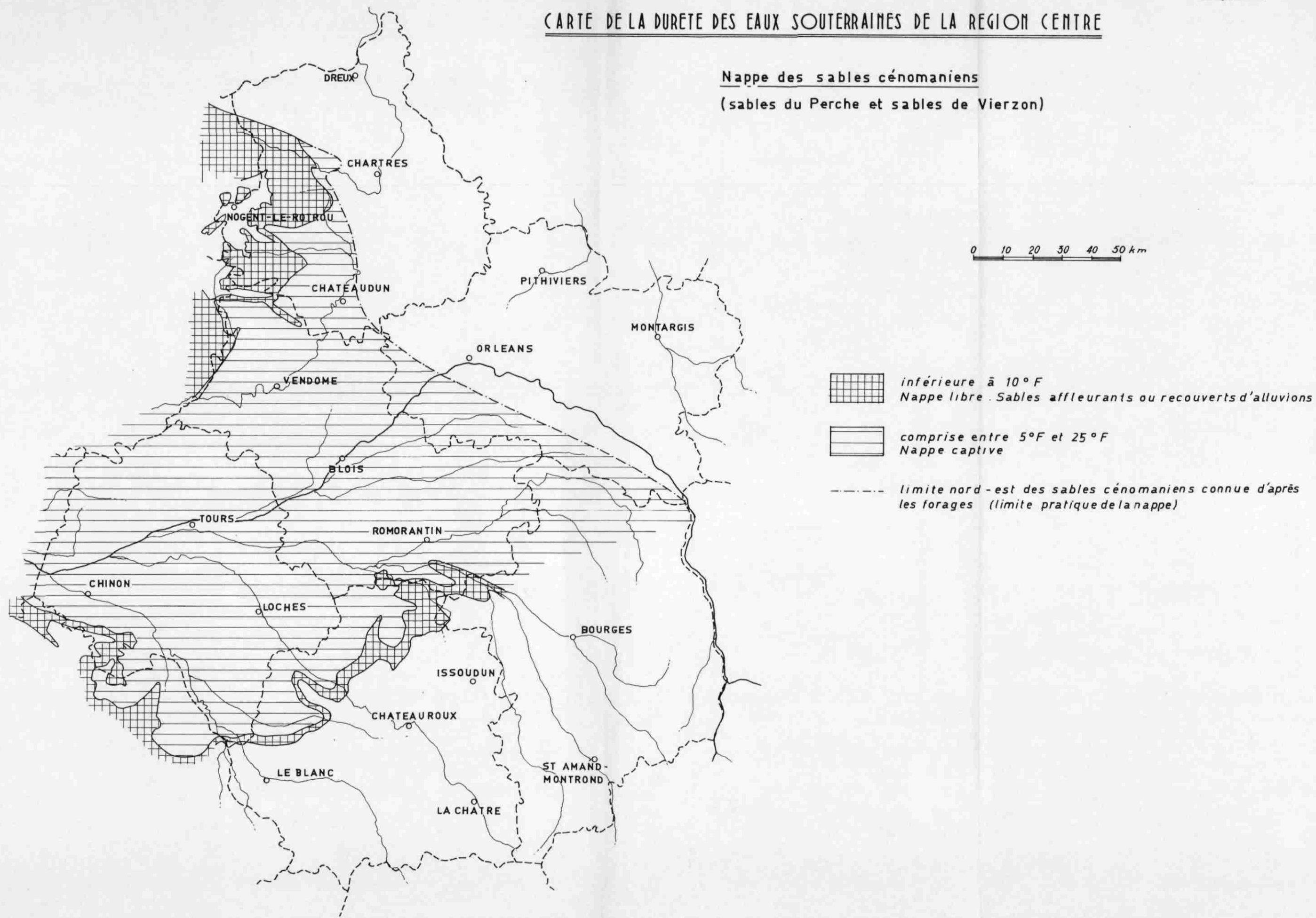
CARTE DE LA DURETE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA REGION CENTRE
Répartition géographique de la dureté de l'eau de la nappe des calcaires
de Beauce. (d'après N. DESPREZ, C. MEGNIEN "Hydrogéologie de la Beauce")

-  comprise entre 20° F et 25° F
-  comprise entre 25° F et 30° F
-  supérieure à 30° F



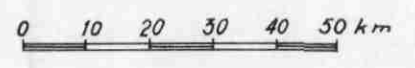
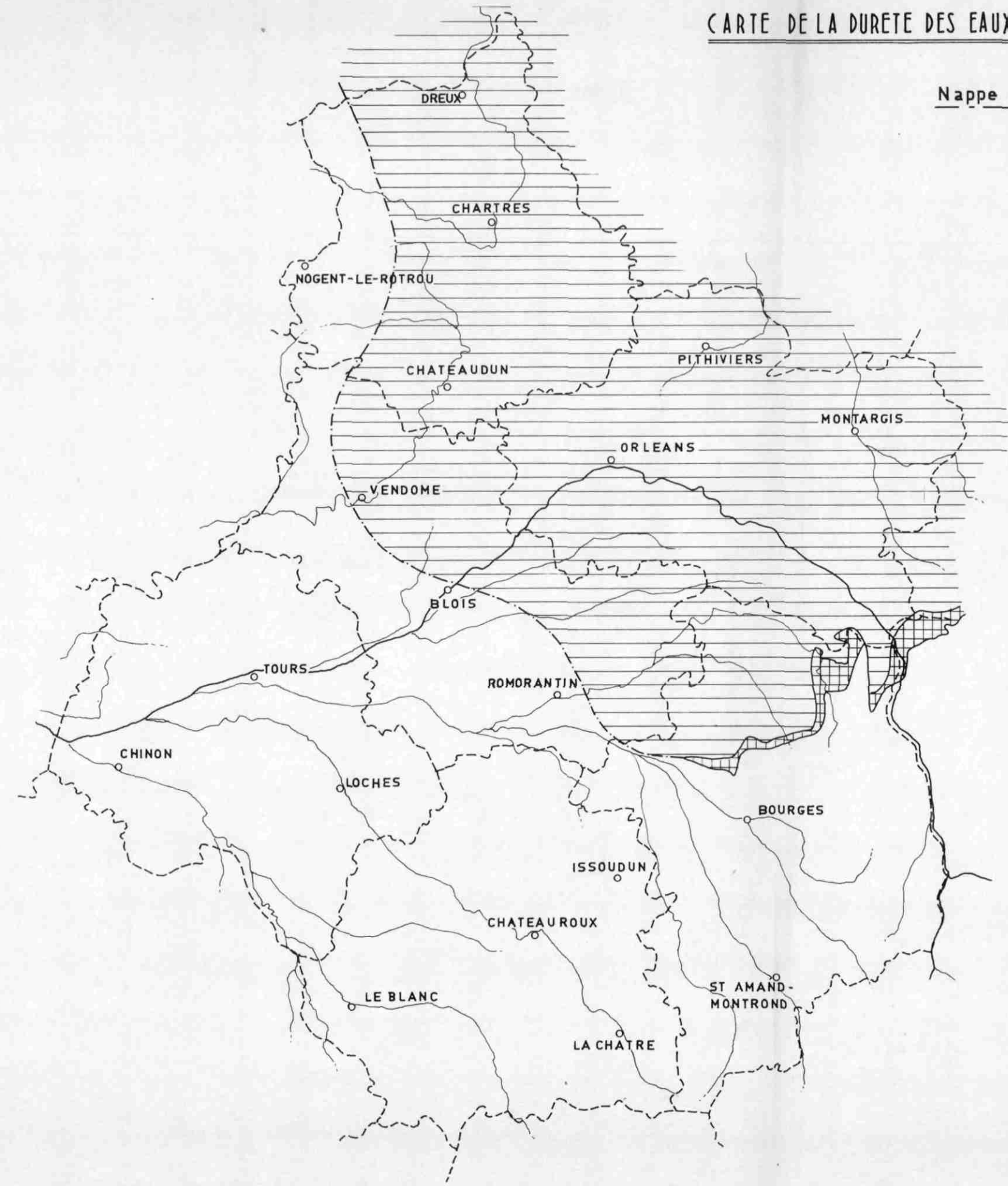
CARTE DE LA DURETE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA REGION CENTRE

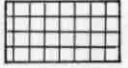


Nappe des sables cénomaniens
(sables du Perche et sables de Vierzon)



CARTE DE LA DURETE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA REGION CENTRE

Nappe des sables verts (Albien)



-  inférieure à 10° F
Nappe libre. Sables affleurants ou recouverts d'alluvions
-  comprise entre 5° F et 20° F
Nappe captive
-  limite ouest des couches sableuses et gréseuses dans l'Albien . (limite pratique de la nappe)

**CARTE DE LA DURETE DES EAUX SOUTERRAINES
DE LA REGION CENTRE**

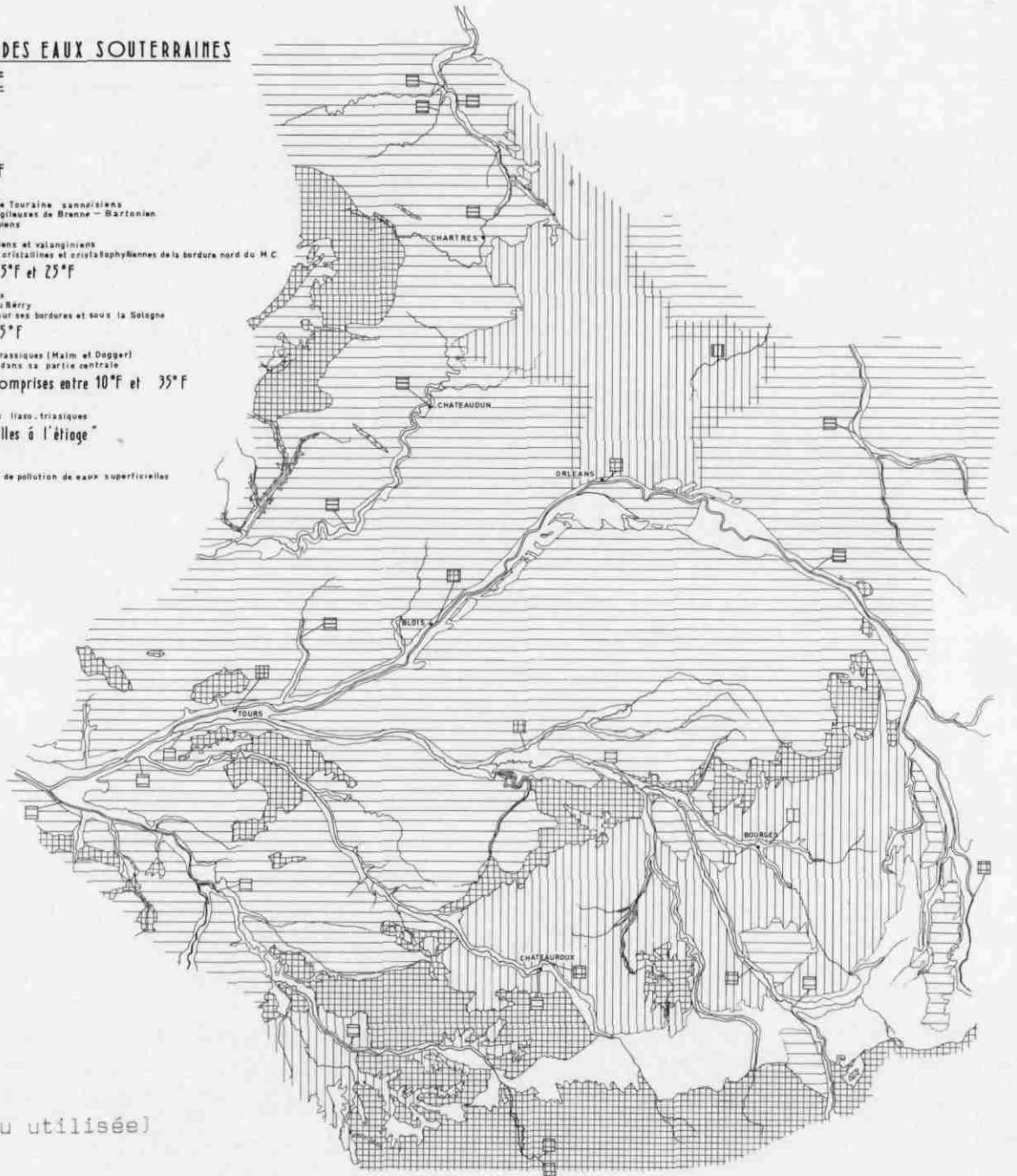
Carte synthétique

- Valeurs inférieures à 15° F**
 Nappe des sables vindoboniens
 Nappe des calcaires lacustres de Touraine sannaziens
 Nappe des formations sable-argileuses de Brenne - Bartonien
 Nappe libre des sables oémunaniens
 Nappe libre des sables albiens
 Nappe libre des sables bartremiens et valanginiens
 Réseau aquifère des formations cristallines et cristallophylliennes de la bordure nord du M.C.
- Valeurs comprises entre 15° F et 25° F**
 Nappe de la craie et des lutites
 Nappe des calcaires lacustres du Berry
 Nappe des calcaires de Beauce sur ses bordures et sous la Sologne
- Valeurs supérieures à 25° F**
 Réseau aquifère des calcaires jurassiques (Malm et Dogger)
 Nappe des calcaires de Beauce dans sa partie centrale
- Valeurs très dispersées comprises entre 10° F et 35° F**
 Nappe alluviale
 Réseau aquifère des formations liaso-triasiques
- Dureté des eaux superficielles à l'été***

* extrait de l'inventaire du degré de pollution de eaux superficielles
Campagne 1971

échelle

0 5 10 15 20 25 km



(dureté de l'eau utilisée)