

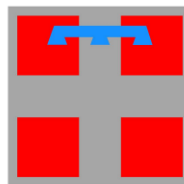


Interreg
ALCOTRA

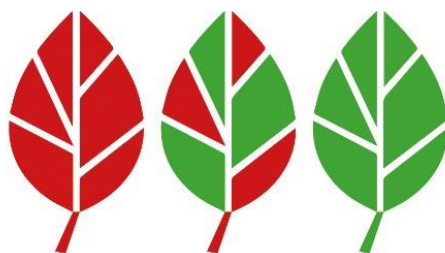
Fonds européen de développement régional
Fondo europeo di sviluppo regionale



UNION EUROPÉENNE
UNIONE EUROPEA



**REGIONE
PIEMONTE**



MITIMPACT

**Modellizzazioni a micro e a macroscale dei flussi di ozono,
valutazione e impatti e definizione strategie /
Modélisations à micro et macro définition des fluxes
d’ozone, évaluation des impacts et définition des
stratégies (WP4)**

**Prodotto 4.2.1 Cartografia con i risultati della modellizzazione /
Livrable 4.2.1 Cartographie avec les résultats de la modélisation**

Luglio 2020 / Juillet 2020

Responsabile WP4: Arpa Piemonte

Dipartimento Rischi Ambientali e Naturali
Via Pio VII, 9

10135 Torino - Italia

tel. +39 011 19680448

fax +39 011 19681341

e-mail: dip.rischi.naturali.ambientali@arpa.piemonte.it

www.arpa.piemonte.gov.it



Gruppo di lavoro:

Francesca Bissardella, Cinzia Cascone, Monica Clemente, Roberta De Maria, Stefania Ghigo, Marilena Maringo

GeographR

1 rue de Taulignan 84000 Avignon - France

Tél. +33 06 84 35 21 05

e-mail: philippe.rossello@geographr.fr



Gruppo di lavoro:

Philippe Rossello

Prodotto 4.2.1 Cartografia con i risultati della modellizzazione (GeographR) / Cartographie avec les résultats de la modélisation (GeographR)

Di fronte ai cambiamenti climatici, il territorio transfrontaliero (Francia-Italia) è vulnerabile poiché è sottoposto alla forte influenza del Mar Mediterraneo e delle montagne. E' esposto a rischi e pressioni che possono impattare gli ecosistemi naturali e le attività umane. Per proteggere questo territorio e le sue ricchezze, e dare delle risposte adatte ad ogni contesto territoriale, è necessario conoscere il clima locale di oggi e di domani ad alta risoluzione spaziale.

Le stazioni meteorologiche forniscono delle informazioni locali riguardanti un ambiente che ha dei vincoli fisici particolari: quota, orientamento, pendenza e il fatto di essere incastonato tra mare e montagne... La dimensione locale è intrinseca ad ogni rilievo. A lungo termine, questi dati geolocalizzati consentono di caratterizzare un clima su scala temporale. Le stazioni meteorologiche di Météo-France o di ARPA Piemonte o ARPA Liguria, per esempio, posizionate su tutto il territorio interregionale, rispondono a questa problematica.

Da un punto di vista generale, la modellizzazione, conferisce una dimensione spaziale (2D, 3D) che permette di stimare in qualsiasi punto dello spazio il valore di una variabile qualunque su grande scala, su scala regionale, o addirittura locale. La qualità delle stime dipende dai dati di partenza, dagli algoritmi sviluppati e dal sistema di elaborazione adottato. La modellizzazione ha quindi il merito di produrre delle stime spazializzate su una data scala temporale, tuttavia le proiezioni climatiche regionali sono fornite a risoluzione spaziale media (8 km in Francia, 12 km in Italia), insufficiente per realizzare degli studi d'impatto, soprattutto in montagna dove la topografia è complessa.

Oltre alle misure locali e alla modellizzazione, le tecniche geostatistiche danno la possibilità di spazializzare i dati locali tenendo conto delle variabili esplicative derivate dal modello numerico del terreno, dell'occupazione della superficie, delle variabili biofisiche... A partire da una serie di dati locali e di variabili esplicative, queste tecniche permettono di stimare in qualsiasi punto dello spazio un valore in funzione del peso di ogni variabile esplicativa.

Per tracciare una mappa del clima presente e futuro ad alta risoluzione spaziale, GeographR ha utilizzato le misure locali, la geostatistica e le proiezioni climatiche (Euro-Cordex), derivanti dagli scenari sulle emissioni, messe a disposizione sui portali DRIAS¹ e IS-ENES².

Face au changement climatique, le territoire transfrontalier (France-Italie), soumis notamment à une forte influence méditerranéenne et montagnarde, est vulnérable. Il est exposé à des risques et pressions susceptibles d'affecter les écosystèmes naturels et les activités humaines. Pour protéger ce territoire et ses richesses, et apporter des réponses adaptées à chaque contexte territorial, il est nécessaire de connaître le climat local à haute résolution spatiale d'aujourd'hui et de demain.

Les stations météorologiques fournissent des informations locales représentatives d'un environnement qui subit des contraintes physiques particulières : altitude, orientation, pente, encaissement... La dimension locale est intrinsèque à chaque relevé. Sur le long terme, ces données géolocalisées permettent de caractériser un climat à une échelle temporelle. Les stations météorologiques de Météo-France ou d'ARPA Piémont ou ARPA Ligurie, par exemple, réparties sur tout le territoire interrégional, répondent à cette problématique.

La modélisation, d'un point de vue général, apporte une dimension spatiale (2D, 3D) qui permet d'estimer en tout point de l'espace la valeur d'une variable quelconque à grande échelle, à l'échelle régionale, voire locale. La qualité des estimations dépend des données d'entrée, des algorithmes

¹ www.drias-climat.fr/

² <https://climate4impact.eu/>

développés et de la chaîne de traitements mise en œuvre. La modélisation a donc le mérite de produire des estimations spatialisées à une échelle temporelle donnée, mais les projections climatiques régionales sont fournies à moyenne résolution spatiale (8 km en France, 12 km en Italie), ce qui est insuffisant pour réaliser des études d'impact, notamment en montagne où la topographie est complexe.

En complément des mesures locales et de la modélisation, les techniques géostatistiques donnent la possibilité de spatialiser des données locales en prenant en compte des variables explicatives dérivées du modèle numérique de terrain, de l'occupation de surface, de variables biophysiques... À partir d'une série de données locales et de variables explicatives, ces techniques permettent d'estimer en tout point de l'espace une valeur en fonction du poids de chaque variable explicative.

Pour cartographier à haute résolution spatiale le climat présent et futur, GeographR a combiné les mesures locales, la géostatistique et les projections climatiques (Euro-Cordex), issues des scénarios d'émissions, mises à disposition sur les portails DRIAS¹⁵ et IS-ENES¹⁶.

Principali obiettivi dello studio

Principaux objectifs de l'étude

Per valutare l'impatto del cambiamento climatico sulla vegetazione transfrontaliera e definire delle strategie di adattamento, GeographR ha sviluppato un sistema di elaborazione numerico che consente di mappare il clima locale attuale e anticipare il cambiamento climatico agli orizzonti futuri 2035, 2055 e 2085 ad alta risoluzione spaziale: 100 metri per le temperature dell'aria, 1000 metri per le precipitazioni.

In questo modo, per rispondere ai bisogni degli attori territoriali, è stata realizzata una serie di mappe del clima presente e futuro con una risoluzione spaziale molto precisa. Tenuto conto dei vincoli tecnici, dell'accesso agli archivi meteorologici e della loro disponibilità, il clima attuale va dal 1998 al 2017, ossia un periodo di 20 anni, e gli orizzonti futuri corrispondono ai periodi 2026-2045, 2046-2065 e 2076-2096. Tale scelta di orizzonti è dettata dalla volontà di sensibilizzare i decisori locali e le equipe tecniche (collettività, sindacati...), le imprese, le associazioni, ma anche i cittadini. Questo studio del clima presente e futuro prende in esame quattro variabili: temperature minime, massime e medie e precipitazioni. Il metodo geostatistico non è stato implementato per altri parametri climatici; ad esempio, è stato testato durante studi precedenti sull'umidità, ma l'affidabilità dei risultati era insufficiente per proporre dei risultati attendibili.

Lo studio prospettico (cartografia) del clima fornisce per:

temperature minime, massime e medie dell'aria:

- medie mensili, stagionali e annuali delle temperature minime, massime e medie per il periodo 1998-2017;
- medie mensili, stagionali e annuali delle temperature minime, massime e medie per il periodo 2026-2045: RCP 4.5 e RCP 8.5 dei modelli Euro-Cordex (mediana);
- medie mensili, stagionali e annuali delle temperature minime, massime e medie per il periodo 2046-2065: RCP 4.5 e RCP 8.5 dei modelli Euro-Cordex (mediana);
- medie mensili, stagionali e annuali delle temperature minime, massime e medie per il periodo 2076-2095: RCP 4.5 e RCP 8.5 dei modelli Euro-Cordex (mediana);

accumuli di precipitazioni:

- medie mensili, stagionali e annuali delle precipitazioni per il periodo 1998-2017;
- medie mensili, stagionali e annuali delle precipitazioni per il periodo 2026-2045: RCP 4.5 e RCP 8.5 dei modelli Euro-Cordex (mediana);
- medie mensili, stagionali e annuali delle precipitazioni per il periodo 2046-2065: RCP 4.5 e RCP 8.5 dei modelli Euro-Cordex (mediana);

- medie mensili, stagionali e annuali delle precipitazioni per il periodo 2076-2085: RCP 4.5 e RCP 8.5 dei modelli Euro-Cordex (mediana).

Le temperature e le precipitazioni sono misurate a 2 metri dal suolo. Il periodo di riferimento è limitato a 20 anni, poiché l'accesso ai dati locali (stazioni meteo) è vincolante (numero di postazioni, interruzioni negli archivi...). La normale viene calcolata idealmente a partire da un congiunto di dati di 30 anni, ma un periodo di 20 anni viene già considerato significativo dai climatologi.

Pour évaluer l'impact du changement climatique sur la végétation transfrontalière et définir des stratégies d'adaptation, GeographR a développé une chaîne de traitements numériques permettant de cartographier le climat local actuel et d'anticiper le changement climatique aux horizons futurs 2035, 2055 et 2085 à haute résolution spatiale : 100 mètres pour les températures de l'air, 1000 mètres pour les précipitations.

Ainsi, pour répondre aux besoins des acteurs territoriaux, une série de cartes du climat présent et futur à fine résolution spatiale a été réalisée. Compte tenu des contraintes techniques, de l'accès aux archives météorologiques et leur disponibilité, le climat actuel s'étend de 1998 à 2017, soit une période de 20 ans, et les horizons futurs correspondent aux périodes 2026-2045, 2046-2065 et 2076-2096. Ce choix d'horizons est dicté par la volonté de sensibiliser les élus et les équipes techniques (collectivités, réserves, syndicats...), les entreprises, les associations, mais aussi les citoyens. Cette étude du climat présent et futur visent quatre variables : températures minimales, maximales et moyennes, et précipitations. La méthode géostatistique n'a pas été mise en œuvre pour d'autres paramètres climatiques. Elle a été testée lors d'études antérieures pour l'humidité, par exemple, mais la fiabilité des résultats était insuffisante pour proposer des résultats fiables.

L'étude prospective (cartographie) du climat fournit pour :

- ✚ températures minimales, maximales et moyennes de l'air :
 - moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles des températures minimales, maximales et moyennes sur la période 1998-2017 ;
 - moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles des températures minimales, maximales et moyennes sur la période 2026-2045 : RCP 4.5 et RCP 8.5 des modèles Euro-Cordex (médiane) ;
 - moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles des températures minimales, maximales et moyennes sur la période 2046-2065 : RCP 4.5 et RCP 8.5 des modèles Euro-Cordex (médiane) ;
 - moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles des températures minimales, maximales et moyennes sur la période 2076-2095 : RCP 4.5 et RCP 8.5 des modèles Euro-Cordex (médiane) ;
- ✚ cumuls de précipitations :
 - moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles des précipitations sur la période 1998-2017 ;
 - moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles des précipitations sur la période 2026-2045 : RCP 4.5 et RCP 8.5 des modèles Euro-Cordex (médiane) ;
 - moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles des précipitations sur la période 2046-2065 : RCP 4.5 et RCP 8.5 des modèles Euro-Cordex (médiane) ;
 - moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles des précipitations sur la période 2076-2085 : RCP 4.5 et RCP 8.5 des modèles Euro-Cordex (médiane).

Les températures et les précipitations s'entendent à 2 mètres du sol. La période de référence se limite à 20 ans, car l'accès aux données locales (stations météo) est contraignant (nombre de postes, ruptures dans les archives...). Une normale se calcule idéalement à partir d'un jeu de données de 30 ans, mais une période de 20 ans est déjà considérée par les climatologues comme une période significative.

Quale estensione geografica ha la mappatura?

Quelle emprise géographique des travaux cartographiques ?

Le mappe sul clima attuale e futuro coprono lo spazio transfrontaliero che comprende i dipartimenti francesi delle Alpi Marittime, Alpi dell'Alta Provenza, Alte Alpi e Savoia, e le province italiane di Imperia, Cuneo e Torino. Questi dipartimenti e province rappresentano il territorio di riferimento. Per estensione, lo studio riguarda in realtà i dipartimenti francesi citati, oltre la parte orientale del dipartimento della Vaucluse e il sud-est dell'Isère, e tutto il territorio delle regioni italiane del Piemonte e della Liguria.

Les cartes du climat actuel et futur couvrent l'espace transfrontalier incluant les départements français des Alpes-Maritimes, des Alpes-de-Haute-Provence, des Hautes-Alpes et de la Savoie, et les provinces italiennes d'Impéria, Cuneo et Turin. Ces départements et provinces représentent le territoire de référence. Par extension, l'étude concerne en réalité les départements français cités, plus l'est du département du Vaucluse et le sud-est de l'Isère, et la totalité des régions italiennes du Piémont et de Ligurie.

Quale metodologia generale?

Quelle méthodologie générale ?

Per perfezionare la risoluzione spaziale degli scenari climatici globali generati dalle simulazioni climatiche di modelli su grande scala (da 50 a 300 km), è necessario applicare dei metodi di regionalizzazione, chiamati anche metodi di riduzione di scala o di disaggregazione spaziale (Figura 36). Ne vengono utilizzati in particolare due: la disaggregazione statistica e la disaggregazione dinamica che perfezionano in modo artificiale la risoluzione spaziale.

Per la disaggregazione statistica, si suppone che il clima regionale dipenda da caratteristiche su grande scala e da proprietà locali come la topografia. Il metodo quindi tiene conto in modo più preciso delle variabili locali e permette di correggere i risultati delle simulazioni calibrandoli alle osservazioni. Tra i metodi di regionalizzazione statistica, si possono citare le funzioni di trasferimento, le analoghe, i quantili e i generatori stocastici di clima. In generale, l'utente crea nuove serie climatiche future basandosi sulle serie osservate e gli output dal modello di clima. Questo metodo presenta il vantaggio di essere poco costoso in termini di tempi di calcolo.

La disaggregazione dinamica consiste piuttosto nel "risolvere esplicitamente la fisica e la dinamica del sistema climatico regionale". Per applicare questo metodo più complesso e vincolante, è necessario utilizzare un modello climatico a maglia variabile o un modello ad area limitata indotto da un modello su grande scala. Questi modelli regionali funzionano con una risoluzione da 10 a 50 km. E' anche possibile combinare gli approcci statistico e dinamico (metodi statistici-dinamici).

Pour affiner la résolution spatiale des scénarios climatiques globaux issus des simulations climatiques de modèles à grande échelle (50 à 300 km), il est nécessaire d'appliquer des méthodes de régionalisation, appelées aussi méthodes de descente d'échelle ou de désagrégation spatiale (Figure 36). Deux méthodes de régionalisation sont utilisées : la désagrégation statistique et la désagrégation dynamique qui affinent de manière artificielle la résolution spatiale.

Pour la désagrégation statistique, on suppose que le climat régional résulte des caractéristiques à grande échelle et des propriétés locales comme la topographie. La méthode prend ainsi en compte d'une manière plus fine les variables locales et permet de corriger les résultats des simulations en les calibrant aux observations. Parmi les méthodes de régionalisation statistique, on peut citer les fonctions de transfert, les analogues, les quantiles et les générateurs stochastiques de climat. De manière générale, l'utilisateur crée de nouvelles séries climatiques futures en se basant sur les séries observées et les sorties du modèle de climat. Cette méthode présente l'avantage d'être peu coûteuse en temps de calcul.

La désagrégation dynamique consiste plutôt à « résoudre explicitement la physique et la dynamique du système climatique régional ». Pour appliquer cette méthode plus complexe et contraignante, il est nécessaire d'utiliser un modèle climatique à maille variable ou un modèle à aire limitée forcé par un modèle de grande échelle. Ces modèles régionaux fonctionnent à des résolutions de 10 à 50 km. Il est également possible de combiner les approches statistique et dynamique (méthodes statistico-dynamiques).

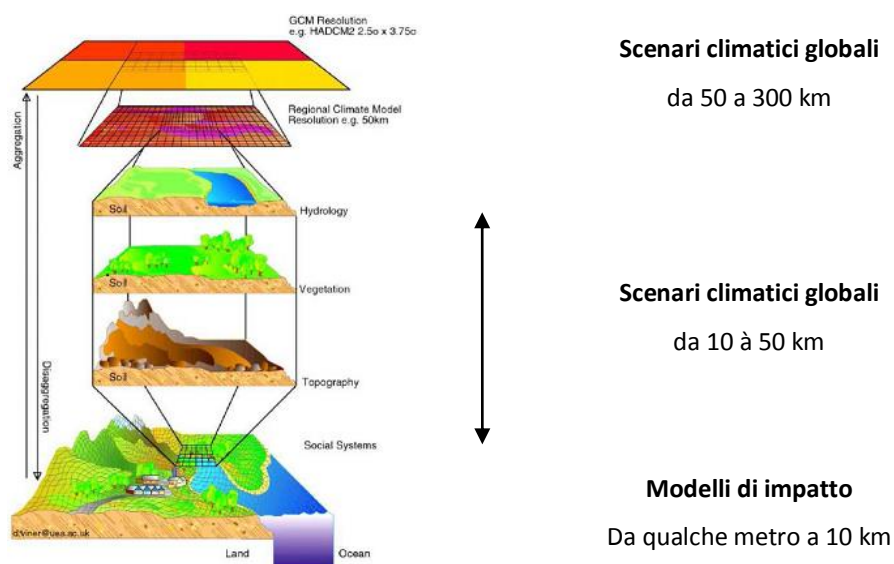


Figura 36. Le tappe della disaggregazione spaziale (fonte: SRU)

Figure 36. Les étapes de la désagrégation spatiale (source : SRU)

Per la regionalizzazione delle proiezioni degli scenari climatici globali, è stata utilizzata una cinquantina di modelli regionali al fine di analizzare i lavori dell'ultimo rapporto del GIEC (AR5). In Francia, sul portale DRIAS³, i dati sono messi a disposizione su una scala spaziale di 8 km, che è ancora insufficiente per caratterizzare il clima futuro su scala locale (per esempio, nei territori alpini, i fondovalle e le vette si confondono, la destra e la sinistra orografiche sono indifferenziate...). Per porre rimedio a questo problema, è possibile ottimizzare i risultati dei modelli regionali utilizzando dei modelli di impatto o di adattamento locali. La risoluzione spaziale finale varia in funzione del modello.

Alcuni programmi, come il Coordinated Regional Downscaling Experiment⁴ (Cordex), per esempio, riguardano anche la regionalizzazione delle simulazioni climatiche e presentano un raffronto dei risultati "su piccola scala su domini limitati". L'ambizione è "rafforzare il coordinamento delle iniziative di riduzione di scala" delle proiezioni climatiche su scala regionale.

La branca europea del progetto internazionale Cordex creata nel 2009 si chiama Euro-Cordex e si occupa "del coordinamento e della produzione di proiezioni climatiche regionali per l'insieme delle regioni del mondo". Euro-Cordex è sostenuto dal Programma di ricerca mondiale sul clima⁵.

Il suo obiettivo è fornire:

- un quadro per la valutazione dei modelli e delle proiezioni climatiche;
- un'interfaccia per gli utilizzatori delle simulazioni climatiche realizzando degli studi di impatto, di adattamento ai cambiamenti climatici o di attenuazione delle emissioni dei gas a effetto serra (GES).

Euro-Cordex propone un insieme di simulazioni climatiche basate su "modelli che includono delle riduzioni di scala statistiche e dinamiche, indotti da modelli globali utilizzati nell'ultimo rapporto del Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico (IPCC)" (Coupled Model Intercomparison Project⁶, Fase 5).

DRIAS e Euro-Cordex offrono quindi un approccio multi-modello.

Pour la régionalisation des projections des scénarios climatiques globaux, une cinquantaine de modèles régionaux a été utilisée pour analyser les travaux du dernier rapport du GIEC (AR5). En France, sur le portail DRIAS¹⁷, les données sont mises à disposition à une échelle spatiale de 8 km, une échelle encore

³ <http://www.drias-climat.fr>

⁴ <http://www.cordex.org>

⁵ <http://www.wcrp-climate.org>

⁶ <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5>

insuffisante pour caractériser le climat futur à l'échelle locale (dans les territoires alpins, par exemple, les fonds de vallée et les sommets se confondent, l'ubac et l'adret sont indifférenciés...). Pour remédier à ce problème, il est possible d'affiner les résultats des modèles régionaux en utilisant des modèles d'impact ou d'adaptation locaux. La résolution spatiale finale est variable selon le modèle.

Des programmes, comme Coordinated Regional Downscaling Experiment¹⁸ (Cordex), par exemple, se penchent également sur la régionalisation des simulations climatiques et présentent l'inter-comparaison des résultats « à petite échelle sur des domaines limités ». L'ambition est de « renforcer la coordination des initiatives de réduction d'échelle » des projections climatiques à l'échelle régionale.

La branche européenne du projet international Cordex créé en 2009 s'appelle Euro-Cordex. Ce dernier vise « la coordination et la production de projections climatiques régionales pour l'ensemble des régions du globe ». Il est soutenu par le Programme mondial de recherche sur le climat¹⁹.

Son objectif est de fournir :

- un cadre pour l'évaluation des modèles et des projections climatiques ;
- une interface pour les utilisateurs de simulations climatiques réalisant des études d'impact, d'adaptation au changement climatique ou d'atténuation des émissions des gaz à effet de serre (GES).

Euro-Cordex propose un ensemble de simulations climatiques basées sur des « modèles incluant des descentes d'échelle statistiques et dynamiques, forcés par les modèles globaux utilisés dans le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) » (Coupled Model Intercomparison Project²⁰, Phase 5).

DRIAS et Euro-Cordex offrent ainsi une approche multi-modèles.

Qual è l'interesse dell'approccio multimodello?

Quel est l'intérêt de l'approche multi-modèles ?

Esso permette di prendere in considerazione le incertezze scientifiche e tecniche legate alle conoscenze, e quindi al funzionamento interno dei modelli climatici, alle future scelte socioeconomiche delle società (scenari di emissione), alla variabilità naturale del clima, ma anche all'incertezza specifica dei metodi di disaggregazione (la riduzione di scala).

Il portale DRIAS propone delle simulazioni climatiche Euro-Cordex che derivano da 10 modelli per gli scenari socioeconomici RCP 4.5 (intermedio) e 11 modelli per lo scenario RCP 8.5 (pessimista). I produttori forniscono uno o più modelli di clima regionale, controllati da uno o più modelli di clima globali. I risultati degli scenari 2.6 (salvo eccezioni) e 6.0 sono esclusi. Tenuto conto degli attuali impegni degli Stati e dell'attuazione effettiva delle politiche di attenuazione dei gas a effetto serra su scala mondiale, lo scenario socioeconomico RCP 2.6 è considerato, salvo una diminuzione massiva e molto rapida delle emissioni di gas a effetto serra a livello internazionale, troppo ottimista dalla comunità scientifica, anche se è ancora possibile perseguirlo. Il rapporto speciale 1.5 dell'IPCC contiene una descrizione di uno scenario ancora più virtuoso (aumento medio della temperatura mondiale di 1,5°C) a condizione di agire immediatamente e su scala mondiale.

Le simulazioni dei modelli climatici regionali Euro-Cordex sono anche disponibili sul sito web IS-ENES Climate4Impact⁷ ad una risoluzione di 12 km. La riduzione di scala è meno precisa rispetto a DRIAS, ma le evoluzioni climatiche su scala regionale sono comunque importanti per definire il clima futuro. L'obiettivo di Climate4Impact è facilitare l'utilizzo dei dati climatici risultati dalla ricerca, di fornire dei dati e degli indici ai consulenti che lavorano sugli impatti del cambiamento e dell'adattamento.

Elle permet de prendre en compte les incertitudes scientifiques et techniques liées aux connaissances, et donc au fonctionnement interne des modèles climatiques, aux futurs choix socio-économiques des

⁷ <https://is.enes.org>

sociétés (scénarios d'émissions), à la variabilité naturelle du climat, mais aussi à l'incertitude spécifique des méthodes de désagrégation (la descente d'échelle).

Le portail DRIAS propose des simulations climatiques Euro-Cordex provenant de 10 modèles pour le scénario socio-économique RCP 4.5 (intermédiaire) et 11 modèles pour le scénario RCP 8.5 (pessimiste). Les producteurs fournissent un ou des modèle(s) de climat régional, contrôlé(s) en bordure par un ou des modèle(s) de climat global. Les résultats des scénarios 2.6 (sau exceptions) et 6.0 sont exclus. Compte tenu des engagements actuels des États et de la mise en œuvre effective des politiques d'atténuation des gaz à effet de serre à l'échelle mondiale, le scénario socio-économique RCP 2.6 est considéré, sauf diminution massive et très rapide des émissions de gaz à effet de serre au niveau international, trop optimiste par la communauté scientifique, même s'il est encore possible de le suivre. Le rapport spécial 1.5 du GIEC a même décrit un scénario plus vertueux encore (hausse moyenne de la température mondiale de 1,5°C) à condition d'agir immédiatement et à l'échelle mondiale.

Les simulations des modèles climatiques régionaux Euro-Cordex sont également disponibles sur le site web IS-ENES Climate4Impact²¹ à une résolution de 12 km. La descente d'échelles est moins fine que sur DRIAS, mais les tendances climatiques à l'échelle régionale restent pertinentes pour définir le climat futur. L'objectif de Climate4Impact est de faciliter l'utilisation des données climatiques issues de la recherche, de fournir des données et des indices aux consultants qui travaillent sur les impacts du changement et l'adaptation.

Principio di caratterizzazione del clima presente e futuro

Principe de caractérisation du climat présent et futur

Per mappare il clima futuro, la metodologia generale applicata in questo studio permette di caratterizzare il clima presente (1998-2017) ad alta risoluzione spaziale e di applicare dei delta provenienti dagli output dei modelli regionali in funzione degli scenari di emissione RCP agli orizzonti 2026-2045, 2046-2065 e 2076-2095. Questo metodo rientra nella categoria dei metodi di regionalizzazione statistici del tipo "delta" o "anomalie". Per anomalie, si intendono gli scostamenti constatati tra gli output dei modelli regionali su un periodo di riferimento dato e gli output di questi stessi modelli su un periodo ulteriore equivalente alla durata del periodo di riferimento.

Per mappare il clima futuro ad alta risoluzione spaziale, si "disturba" il clima presente applicando le anomalie ai valori del periodo di riferimento che sono stimati in qualsiasi punto dello spazio tramite un metodo geostatistico testato. Tale metodo spazializza le misure locali tenendo conto delle variabili fisico-ambientali che spiegano la ripartizione spaziale dei parametri climatici.

Questo metodo di regionalizzazione statistica non prende quindi in considerazione la dinamica dell'atmosfera in tutta la colonna. Per applicare il metodo delle anomalie, è essenziale determinare nel modo più preciso possibile il clima di oggi. E' una tappa fondamentale che condiziona la qualità dei risultati.

Pour cartographier le climat futur, la méthodologie générale mise en application dans cette étude est de caractériser le climat présent (1998-2017) à haute résolution spatiale et d'appliquer des deltas provenant des sorties de modèles régionaux en fonction des scénarios d'émissions RCP aux horizons 2026-2045, 2046-2065 et 2076-2095. Cette démarche se situe dans la catégorie des méthodes de régionalisation statistiques du type « deltas » ou « anomalies ». Par anomalies, on entend les écarts constatés entre les sorties de modèles régionaux sur une période de référence donnée et les sorties de ces mêmes modèles sur une période ultérieure équivalente à la durée de la période de référence.

Pour cartographier le climat futur à haute résolution spatiale, on « perturbe » le climat présent en appliquant les anomalies aux valeurs de la période de référence qui sont estimées en tout point de l'espace à l'aide d'une méthode géostatistique éprouvée. Cette méthode géostatistique spatialise les mesures locales en prenant en compte des variables physico-environnementales qui expliquent la répartition spatiale des paramètres climatiques.

Cette méthode de régionalisation statistique ne prend donc pas en compte la dynamique de l'atmosphère sur toute sa colonne. Pour appliquer la méthode des anomalies, il est essentiel de déterminer

le plus finement possible le climat d'aujourd'hui. C'est une étape déterminante qui conditionne la qualité des résultats.

Presentazione del metodo geostatistico per mappare il clima presente

Présentation de la méthode géostatistique pour cartographier le climat présent

Per realizzare lo studio prospettico sul clima e caratterizzare il clima presente, GeographR ha utilizzato, acquisendone la licenza, il software LISDQS, sviluppato dal Centro nazionale per la ricerca scientifica (CNRS). Questo software consente di "raccolgere, gestire ed elaborare l'insieme delle informazioni necessarie per il funzionamento delle interpolazioni". E' uno strumento che riunisce l'insieme delle procedure necessarie all'interpolazione, risponde ai bisogni della ricerca (fattori strutturanti degli elementi del clima) e facilita la produzione delle mappe.

LISDQS privilegia due orientamenti per migliorare le stime: la ricerca di predittori efficaci e la messa a punto di una tecnica di interpolazione spaziale innovativa. I dati di base da integrare nel LISDQS sono le misure locali e il modello numerico del luogo da cui sono tratti la quota, la pendenza, l'orientamento dei versanti, la rugosità, la radiazione globale teorica, il fatto di essere incastonati, le forme topografiche... Inoltre, a seconda del tipo di studio, è possibile tener conto di numerose variabili esplicative come l'occupazione del suolo, l'indice di vegetazione normalizzato, l'indice fogliare, le distanze euclidee (dalla foresta, dalla città, dal mare), la densità del costruito... Per garantire l'integrazione corretta degli effetti di scala, ogni variabile può avere delle finestre in funzione della sua influenza.

LISDQS propone quattro tecniche: il kriging (ordinario), le regressioni, l'inverso della distanza e i polinomi. L'utilizzatore seleziona una tecnica per stimare la variabile che lo interessa e calcolare i residui, poi sceglie una delle altre tre tecniche per stimare i residui della 1° tappa.

In caso di regressioni, le variabili esplicative vengono incrociate nell'ambito di una regressione multipla. I coefficienti sono considerati come operatori cartografici per ricostituire il campo continuo della variabile d'interesse. Vengono proposti due tipi di regressioni:

- ✓ regressione globale: si applica una sola regressione utilizzando l'insieme del corpus disponibile (n stazioni)
- regressione locale: le n stazioni più prossime ad ogni pixel dell'area studiata sono ricercate, poi i pixel legati alle stesse stazioni sono raggruppati in seno ad un poligono (Figura 37), vengono effettuate delle regressioni (identificazione dei migliori regressori, e in seguito regressione multipla) e il kriging. La densità irregolare delle stazioni causa delle distorsioni nell'area di reclutamento delle n stazioni. Il vantaggio è poter realizzare dei calcoli a partire da un'informazione locale che migliora le stime, ma anche di mappare dei coefficienti di correlazione e di regressione.

Pour mener cette étude prospective du climat et caractériser le climat présent, le logiciel LISDQS, développé par le Centre national de la recherche scientifique (CNRS), a été utilisé par GeographR qui a acquis une licence. Ce logiciel permet de « rassembler, gérer et traiter l'ensemble des informations nécessaires au fonctionnement des interpolations ». Il réunit dans un même outil l'ensemble des procédures nécessaires à l'interpolation, répond aux besoins de la recherche (facteurs structurants des éléments du climat par exemple) et facilite la production de cartes.

LISDQS privilégie deux directions pour améliorer les estimations : la recherche de prédicteurs efficaces et la mise au point d'une technique d'interpolation spatiale innovante. Les données de base à intégrer dans LISDQS sont les mesures locales et le modèle numérique de terrain dont sont dérivés l'altitude, la pente, l'orientation des versants, la rugosité, le rayonnement global théorique, l'encaissement, les formes topographiques... En complément, selon le type d'étude, il est possible de prendre en compte de nombreuses variables explicatives comme l'occupation du sol, l'indice de végétation normalisé, l'indice foliaire, les distances euclidiennes (à la forêt, à la ville, à la mer), la densité du bâti... Pour assurer une prise en compte ajustée des effets d'échelle, chaque variable peut être fenêtrée en fonction de son influence.

Quattro tecniche sono proposte da LISDQS : le krigeage (ordinaire), les régressions, l'inverse de la distance et les polynômes. L'utilisateur sélectionne une technique pour estimer la variable d'intérêt et calculer les résidus, puis choisit l'une des trois autres techniques pour estimer les résidus issus de la 1^{ère} étape.

Dans le cas des régressions, les variables explicatives sont croisées dans le cadre d'une régression multiple. Les coefficients sont considérés comme opérateurs cartographiques pour reconstituer le champ continu de la variable d'intérêt. Deux types de régressions sont proposés :

- ✓ régression globale : une seule régression est appliquée en utilisant l'ensemble du corpus disponible (n stations)
- ✓ régression locale : les n plus proches stations de chaque pixel de l'aire d'étude sont recherchées, puis les pixels rattachés aux mêmes stations sont regroupés au sein d'un polygone (Figure 37) pour lesquels régressions (identification des meilleurs régresseurs, puis régression multiple) et krigeage sont effectués. La densité irrégulière des stations entraîne des distorsions dans l'aire de recrutement des n stations. L'avantage est de réaliser des calculs à partir d'une information locale qui améliore les estimations, mais aussi de cartographier des coefficients de corrélation et de régression.

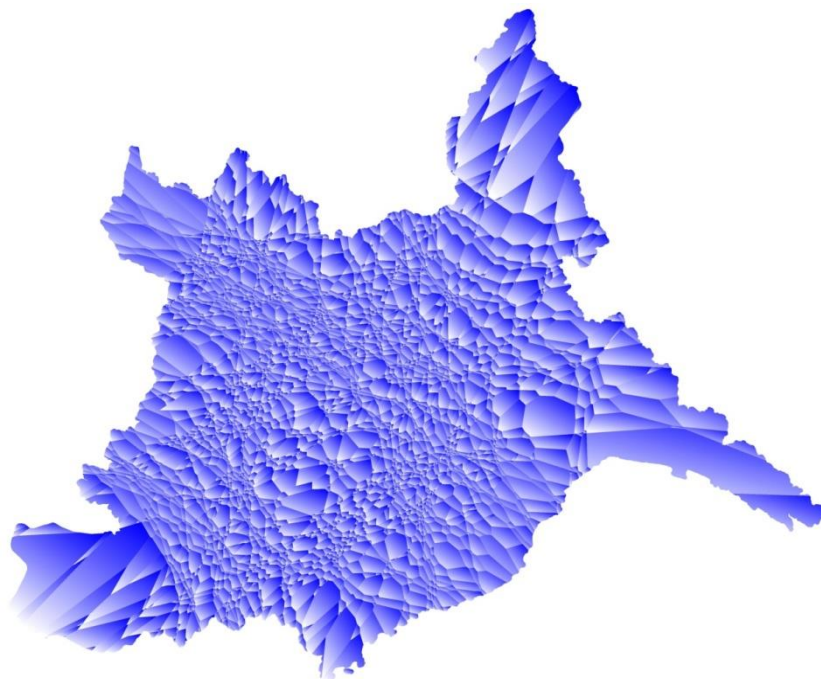


Figura 37. Poligoni che raggruppano i pixel legati alle stesse n stazioni nel quadro di una regressione locale (esempio delle temperature dell'aria)

Figure 37. Polygones regroupant les pixels rattachés aux mêmes n stations dans le cadre d'une régression locale (exemple des températures de l'air)

Gli errori di stima sono calcolati dopo ogni tappa mediante validazione incrociata. Ad ogni esecuzione, una stazione viene ritirata dal corpus e i coefficienti delle regressioni sono calcolati sulla base delle $n-1$ stazioni restanti. Questa operazione permette di ottenere un valore stimato che è paragonato al valore osservato. La qualità statistica dell'interpolazione può essere valutata da n valori di scostamento. Vengono anche controllate le ridondanze delle variabili esplicative e la colinearità.

Per questo studio, la spazializzazione delle variabili climatiche in qualsiasi punto dello spazio è stata realizzata in 3 fasi:

- fase 1: corrisponde alla stima dei valori mediante le regressioni multiple (composte, per ciascuna delle n situazioni da analizzare, dalle variabili significative alla soglia del 5 %)
- fase 2: il residuo, calcolato mediante validazione incrociata, è a sua volta stimato mediante kriging
- fase 3: corrisponde alla somma delle due stime precedenti: fase 1 + fase 2.

La fase 4, che consiste nel calcolare un nuovo residuo analizzato mediante un processo autoregressivo (ad esempio, integrazione del clima del mese precedente o dell'anno precedente) per il quale si inserisce un residuo finale, è stata testata, ma non utilizzata per conservare l'unità di ogni media mensile, stagionale o annuale del periodo preso in esame.

Le regressioni locali danno dei risultati di migliore qualità. In questo studio quindi è stata privilegiata questa tecnica.

Les erreurs d'estimation sont calculées après chaque étape par validation croisée. À chaque exécution, une station est retirée du corpus et les coefficients des régressions sont calculés sur la base des $n-1$ stations restantes. Cette opération permet d'obtenir une valeur estimée qui est comparée à la valeur observée. La qualité statistique de l'interpolation peut être évaluée par les n valeurs d'écart. Les redondances des variables explicatives, mais aussi la colinéarité sont également contrôlées.

Pour cette étude, la spatialisation des variables climatiques en tout point de l'espace a été réalisée en 3 phases :

- phase 1 : elle correspond à l'estimation des valeurs par les régressions multiples (composées, pour chacune des n situations à analyser, des variables significatives au seuil de 5 %)
- phase 2 : le résidu, calculé par validation croisée, est à son tour estimé par krigeage
- phase 3 : elle correspond à la somme des deux estimations précédentes : phase 1 + phase 2.

La phase 4 qui consiste à calculer un nouveau résidu analysé par un processus autorégressif (prise en compte du climat du mois précédent ou de l'année précédente par exemple) pour lequel un résidu final est renseigné, a été testée, mais non utilisée pour conserver l'unité de chaque moyenne mensuelle, saisonnière ou annuelle de la période considérée.

Les régressions locales donnent des résultats de meilleure qualité. Cette technique est donc privilégiée dans cette étude.

La selezione delle variabili climatiche del periodo di riferimento

La sélection des variables climatiques de la période de référence

Per trarre vantaggio da un numero sufficiente di stazioni locali per l'interpolazione spaziale e da una lunga serie di dati continua, e mappare il clima presente, era necessario acquisire una serie di dati climatici per un periodo di riferimento di almeno 20 anni sull'insieme del perimetro di studio. Sono stati consultati i principali produttori interregionali di dati. Tenuto conto degli archivi disponibili e della densità della rete delle stazioni, la scelta di Météo-France, ARPA Piemonte e ARPA Liguria è stata obbligata. Gli storici hanno iniziato a dicembre 1997 per poter tener conto dell'inverno meteorologico del 1998 (da dicembre 1997 a febbraio 1998). Non tutte le variabili meteorologiche sono disponibili per l'insieme delle stazioni e non tutti gli archivi riguardanti il periodo di riferimento sono completi. Le medie sono tuttavia calcolate su un numero sufficiente di punti (stazioni meteo) per applicare il metodo geostatistico (Figura 39): 182 stazioni per le medie della temperatura dell'aria e 209 stazioni per gli accumuli delle precipitazioni. Per le mappe delle temperature, sono state create delle stazioni meteo virtuali al fine di migliorare le stime in alta quota (i valori sono stati stabiliti a partire da osservazioni locali a delle altezze diverse e da gradienti termici altitudinali misurati sul campo, Figura 38).

Pour bénéficier d'un nombre suffisant de stations locales pour l'interpolation spatiale et d'une longue série de données continue, et cartographier le climat présent, il était nécessaire d'acquérir une série de données climatiques sur une période de référence d'au moins 20 ans sur l'ensemble du périmètre d'étude. Les principaux producteurs interrégionaux de données ont été consultés. Compte tenu des archives disponibles et de la densité du réseau de stations, le choix de Météo-France, ARPA Piémont et ARPA Ligurie s'est imposé. Les historiques commencent en décembre 1997 afin de prendre en compte l'hiver météorologique de 1998 (décembre 1997 à février 1998). Toutes les variables météorologiques ne sont pas disponibles pour l'ensemble des stations et les archives sur la période de référence ne sont pas toutes complètes. Les moyennes sont toutefois calculées sur un nombre suffisant de points (stations météo) pour appliquer la méthode géostatistique (Figure 39) : 182 stations pour les moyennes de la température de l'air et 209 stations pour les cumuls des précipitations. Pour les cartes de températures, des stations météo

virtuelles ont été créées pour améliorer les estimations en haute altitude (les valeurs ont été établies à partir d'observations locales à différentes altitudes et de gradients thermiques altitudinaux mesurés sur le terrain, Figure 38).

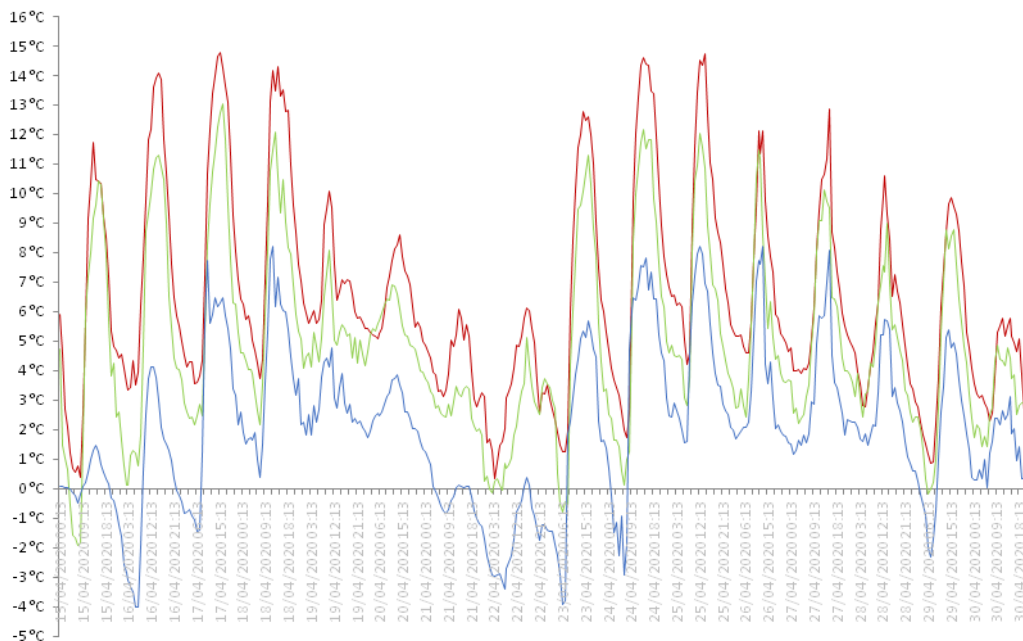


Figura 38. Esempio di rilevamenti orari (dal 15 al 30 aprile) della temperatura nelle 3 postazioni meteo installate per un anno tra Larche e la valle del Lauzanier (Haute-Ubaye) che permettono di determinare i gradienti altitudinali della temperatura minima, massima e media al fine di perfezionare le stime in alta quota : in rosso, sensore situato a 1740 m di altitudine, in verde a 1943m, e in blu a 2211 m. In totale, sono stati posizionati 10 sensori di temperatura nell’Haute-Ubaye e al centro della zona coinvolta e nella riserva della biosfera Luberon-Lure²² ai margini del territorio di riferimento.

Figure 38. Exemple de relevés horaires (15 au 30 avril 2020) de température au niveau de 3 postes météo installés pendant un an entre Larche et la vallée du Lauzanier (Haute-Ubaye) permettant de déterminer les gradients altitudinaux de température minimale, maximale et moyenne en vue d’affiner les estimations en haute altitude : en rouge, capteur situé à 1740 m d’altitude, en vert, à 1943 m, et en bleu, à 2211 m. Au total, 10 capteurs de température ont été mis en place en Haute-Ubaye au cœur de la zone d’intérêt et dans la réserve de biosphère Luberon-Lure⁸ en périphérie du territoire de référence

Il numero di punti presi in considerazione nel LISDQS può dunque variare in funzione degli archivi. La Figura 39 indica la localizzazione delle stazioni meteo. Per media stagionale, si intende la media stagionale meteorologica definita da Météo-France:

- inverno: da dicembre a febbraio
- primavera: da marzo a maggio
- estate: da giugno ad agosto
- autunno: da settembre a novembre.

I dati locali vengono introdotti nel LISDQS per essere interpolati in funzione dell’influenza delle variabili fisico-ambientali, chiamate “variabili esplicative”.

⁸ Per esempio, nella riserva della biosfera Luberon-Lure (versante meridionale), dalle ore 0:00 alle 6 :00 (temperatura minima), il gradiente termico per fascia altitudinale di 100 m era prossimo a 0,3°C e 0,7° dalle 12 :00 alle 16 :00 (temperatura massima). Dans la réserve de biosphère Luberon-Lure (versant sud) par exemple, de 0h00 à 6h00 (température minimale), le gradient thermique par tranche altitudinale de 100 m était proche de 0,3 °C et 0,7 °C de 12h00 à 16h00 (température maximale).

Le nombre de points pris en compte dans LISDQS peut donc varier en fonction des archives. La Figure 39 indique la localisation des stations météo. Par moyenne saisonnière, on entend la moyenne saisonnière météorologique définie par Météo-France :

- hiver : décembre à février
- printemps : mars à mai
- été : juin à août
- automne : septembre à novembre.

Les données locales sont introduites dans LISDQS pour être interpolées en fonction de l'influence de variables physico-environnementales, appelées « variables explicatives ».

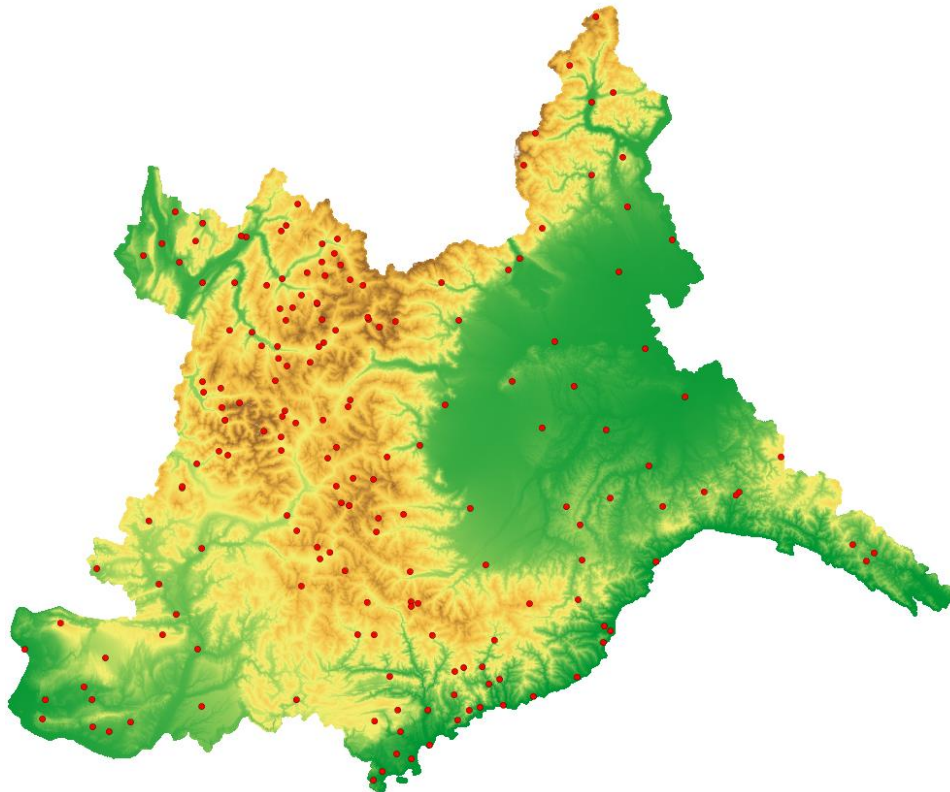


Figura 39. La rete di stazioni meteorologiche utilizzata per l'interpolazione spaziale (esempio delle stazioni che rilevano le temperature dell'aria)

Figure 39. Le réseau de stations météorologiques utilisé pour l'interpolation spatiale (exemple des stations relevant les températures de l'air)

Le variabili esplicative considerate

Les variables explicatives considérées

Per identificare i fattori che spiegano la ripartizione spaziale delle medie delle temperature dell'aria e delle precipitazioni, al LISDQS sono state integrate delle variabili derivate dal modello numerico usato sul campo⁹ dall'IGN e dalla NASA. Le variabili esplicative per determinare il clima di riferimento al quale si aggiungono i delta (o anomalie) risultano dal MNT:

- latitudine (in metri)
- rugosità topografica: indicatore delle irregolarità del rilievo
- incastonamento/sopraelevazione topografica
- ampiezza verticale dei rilievi emergenti

⁹ BD ALTI® 75 m, IGN, oggetto di un nuovo campionamento a 100 m per le temperature e 1000 m per le precipitazioni

- ampiezza verticale delle valli
- volume
- orientamento dei versanti
- seno dei versanti: scomposizione dell'orientamento dei versanti (variazione O-E)
- coseno dei versanti: scomposizione dell'orientamento dei versanti (variazione N-S)
- radiazione globale teorica.

Tutti gli strati di informazione sono proiettati nel Lambert-93, RGF-1993. In totale, 13 variabili esplicative sono integrate al LISDQS (+ variabili dotate di finestre).

Pour identifier les facteurs qui expliquent la répartition spatiale des moyennes de températures de l'air et de précipitations, des variables dérivées du modèle numérique de terrain¹⁰ de l'IGN et de la NASA ont été intégrées à LISDQS. Les variables explicatives pour déterminer le climat de référence auquel sont ajoutés les deltas (ou anomalies) sont issues du MNT :

- latitude (en mètres)
- longitude (en mètres)
- altitude (en mètres)
- pente (°)
- rugosité topographique : indicateur des irrégularités du relief
- encaissement/surélévation topographique
- amplitude verticale des reliefs émergents
- amplitude verticale des creux
- volume
- orientation des versants
- sinus des versants : décomposition de l'orientation des versants (variation O-E)
- cosinus des versants : décomposition de l'orientation des versants (variation N-S)
- rayonnement global théorique.

Toutes les couches d'information sont projetées en Lambert-93, RGF-1993. Au total, 13 variables explicatives intégrées à LISDQS (+ variables fenêtrées).

La modellizzazione del clima futuro

La modélisation du climat futur

Sul portale DRIAS, il periodo di riferimento, ossia il periodo sul quale si basano i modelli per stimare le anomalie è 1971-2005 per i modelli Euro-Cordex (RCP 4.5, RCP 8.5). Il periodo di proiezione per le modellizzazioni future è 2006-2100. I dati grezzi dei modelli regionali vengono corretti dal metodo quantile-quantile, dunque rispetto alle osservazioni. Le simulazioni sono disponibili quotidianamente ad una risoluzione spaziale di 8 km (rianalisi SAFRAN). Una decina di simulazioni Euro-Cordex corrette dalla rianalisi SAFRAN sono disponibili sul portale DRIAS.

Per i dati presenti sul sito IS-ENES (Infrastructure for the European Network for Earth System Modelling), il principio è lo stesso. Questa piattaforma offre l'accesso all'insieme delle simulazioni dei modelli Euro-Cordex (RCP 4.5 e RCP 8.5) e alle variabili climatiche associate. I dati sono disponibili nel formato NetCDF e i punti di griglia sono distanti 12 km. Al di fuori del territorio francese, l'elaborazione dei dati del portale IS-ENES è indispensabile per definire il clima presente e futuro. I modelli disponibili su DRIAS e IS-ENES possono differire in funzione delle variabili climatiche, gli scenari socioeconomici, gli orizzonti futuri, le zone geografiche... In caso di utilizzo congiunto dei dati DRIAS e IS-ENES (zona d'interesse che comprende per esempio la Francia e un paese limitrofo), è necessario paragonare l'elenco dei modelli climatici proposti al fine di selezionare dei dati comparabili. Tale vincolo è stato rispettato per la realizzazione di questo studio riguardante lo spazio transfrontaliero.

¹⁰ BD ALTI® 75 m, IGN, rééchantillonnée à 100 m pour les températures et 1000 m pour les précipitations

Sur le portail DRIAS, la période de référence, soit la période sur laquelle les modèles s'appuient pour estimer les anomalies est 1971-2005 pour les modèles Euro-Cordex (RCP 4.5, RCP 8.5). La période de projection pour les modélisations futures est 2006-2100. Les données brutes des modèles régionaux sont corrigées par la méthode quantile-quantile, donc par rapport aux observations. Les simulations sont disponibles à l'échelle journalière à une résolution spatiale de 8 km (réanalyse SAFRAN). Une dizaine de simulations Euro-Cordex corrigées par réanalyse SAFRAN sont mises à disposition sur le portail DRIAS.

Le principe est le même pour les données mises à disposition sur le site IS-ENES (Infrastructure for the European Network for Earth System Modelling). Cette plateforme offre l'accès à l'ensemble des simulations des modèles Euro-Cordex (RCP 4.5 et RCP 8.5) et aux variables climatiques associées. Les données sont disponibles au format NetCDF et les points de grille sont distants de 12 km. Hors territoire français, l'exploitation des données du portail IS-ENES s'avère indispensable pour définir le climat présent et futur. Les modèles disponibles sur DRIAS et IS-ENES peuvent différer selon les variables climatiques, les scénarios socio-économiques, les horizons futurs, les zones géographiques... En cas d'utilisation conjointe des données DRIAS et IS-ENES (zone d'intérêt incluant la France et un pays limitrophe par exemple), il est nécessaire de comparer la liste des modèles climatiques proposés afin de sélectionner des données comparables. Cette contrainte a été respectée pour la réalisation de cette étude qui couvre l'espace transfrontalier.

I modelli climatici comuni in Francia e in Italia sono i seguenti (in verde, Tabella 10):

Les modèles climatiques communs en France et en Italie sont les suivants (en vert, Tableau 10) :

Proiezioni	Modello	Precipitazioni	Temperature medie	Temperature minime	Temperature massime
Storico	DMI_HIRAM5_ICHEC-EC-EARTH				
	RACMO22E / MetEir-ECEARTH				
	RCA4 / CNRM-CERFACS-CNRM-CM5				
	RCA4 / ICHEC-EC-EARTH				
	RCA4 / MOHC-HadGEM2-ES				
	IPSL-IPSL-CM5A-MR				
	RCA4 / MPI-M-MPI-ESM-LR				
	REMO019/MPI-EMS-LR				
RCP 4.5	CCLM4-8-17_CNRM-CM5				
	CCLM4-8-17_MPI-ESM-LR				
	DMI_HIRAM5_ICHEC-EC-EARTH				
	RACMO22E / MetEir-ECEARTH				
	RCA4 / CNRM-CERFACS-CNRM-CM5				
	RCA4 / ICHEC-EC-EARTH				
	RCA4 / MOHC-HadGEM2-ES				
	REMO019 / MPI-EMS-LR				
RCP 8.5	DMI_HIRAM5_ICHEC-EC-EARTH				
	RACMO22E / MetEir-ECEARTH				
	RCA4 / CNRM-CERFACS-CNRM-CM5				

	RCA4 / ICHEC-EC-EARTH				
	RCA4 / MOHC-HadGEM2-ES				
	IPSL-IPSL-CM5A-MR				
	RCA4 / MPI-M-MPI-ESM-LR				
	REMO019 / MPI-EMS-LR				

Tabella 10. Modelli comuni tra DRIAS e IS-ENES secondo i diversi scenari e orizzonti
Tableau 10. Modèles communs entre DRIAS et IS-ENES selon les divers scénarios et horizons

Per lo studio sono stati privilegiati soltanto i dati dei modelli comuni, ossia da 7 a 8 modelli per variabile, RCP e orizzonte.

Per il periodo di riferimento (1998-2017), le medie mensili, stagionali e annuali delle temperature minime, massime e medie dell'aria (°C), ma anche delle precipitazioni (accumuli in mm), sono state calcolate per tutti i punti di griglia (modelli Euro-Cordex) che coprono il perimetro di studio. Per valutare i delta, queste medie sono anche state calcolate agli orizzonti 2026-2045, 2046-2065 e 2076-2095. Lo scostamento tra il periodo di riferimento e i due orizzonti futuri determina l'evoluzione della temperatura dell'aria e delle precipitazioni.

Seules les données des modèles communs ont été privilégiées pour l'étude, soit 7 à 8 modèles par variable, RCP et horizon.

Pour la période de référence (1998-2017), les moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles des températures minimales, maximales et moyennes de l'air (°C), mais aussi des précipitations (cumul en mm), ont été calculées pour tous les points de grille (modèles Euro-Cordex) qui couvrent le périmètre d'étude. Pour évaluer les deltas, ces moyennes ont aussi été calculées aux horizons 2026-2045, 2046-2065 et 2076-2095. L'écart entre la période de référence et les deux horizons futurs détermine l'évolution de la température de l'air et des précipitations.

Metodo di spazializzazione dei punti di griglia dei modelli e applicazione **Méthode de spatialisation des points de grille des modèles et application**

I dati dei modelli Euro-Cordex sono forniti da punti distanti 8 km (Francia) e 12 km (Italia). Una delle soluzioni per spazializzare i dati è convertire i valori puntuali in maglie (formato raster), come se i valori dei punti fossero riprodotti su una griglia a maglia regolare. La rappresentazione è sotto forma di pixel. Ma per spazializzare il dato in modo più omogeneo e regolare, e ottenere un valore in qualsiasi punto dello spazio del perimetro di studio per le temperature dell'aria e le precipitazioni, viene applicato il metodo d'interpolazione spaziale del prossimo naturale. Per stimare un valore per interpolazione, la tecnica definisce il sottoinsieme di campioni in entrata più prossimo ad un punto e applica a quest'ultimo una ponderazione sulla base di superfici proporzionali. L'obiettivo è produrre una cartografia generale delle anomalie.

La cartografia del clima presente (periodo di riferimento) su scala spaziale precisa, realizzata mediante il LISDQS a partire dalle osservazioni locali e dalle variabili esplicative fisico-ambientali, è ben differenziata dalla cartografia del clima presente derivante dagli output dei modelli Euro-Cordex, poiché i risultati del clima "reale" e del clima modellizzato non possono essere comparati. Sono rappresentazioni distinte dai metodi di calcolo e di produzione, ma anche dalla scala spaziale.

Le anomalie spazializzate dei modelli Euro-Cordex, basate sulla mediana dei risultati delle varie simulazioni dei modelli climatici regionali Euro-Cordex (RCP 4.5 e RCP 8.5), constatate tra il periodo di

riferimento e gli orizzonti futuri, sono applicate ai dati generati dal LISDQS che fornisce la cartografia del clima presente di riferimento mediante la mancanza di tempo.

Le mappe del clima presente e futuro sono la somma delle incertezze legate alla qualità delle misure locali (stazioni di misura), con interpolazione spaziale dei dati, scenari di emissione, output dei modelli globali e regionali (clima futuro) e metodi di correzione dei modelli globali.

Les données des modèles Euro-Cordex sont donc fournies par points distants de 8 km (France) et 12 km (Italie). L'une des solutions pour spatialiser les données est de convertir les valeurs ponctuelles en mailles (format raster), comme si les valeurs des points étaient reproduites sur une grille maillée régulière. La représentation est sous forme de pixels. Mais pour spatialiser la donnée d'une manière plus homogène et régulière, et obtenir une valeur en tout point de l'espace du périmètre d'étude pour les températures de l'air et les précipitations, la méthode d'interpolation spatiale par voisin naturel est appliquée. Pour estimer une valeur par interpolation, la technique définit le sous-ensemble d'échantillons en entrée le plus proche d'un point et applique à ce dernier une pondération sur la base de surfaces proportionnelles. L'objectif est de produire une cartographie générale des anomalies.

La cartographie du climat présent (période de référence) à fine échelle spatiale, réalisée à l'aide de LISDQS à partir des observations locales et des variables explicatives physico-environnementales, est bien différenciée de la cartographie du climat présent issue des sorties des modèles Euro-Cordex, car les résultats du climat « réel » et du climat modélisé ne peuvent pas être comparés. Ce sont des représentations distinctes de par leurs méthodes de calcul et de production, mais aussi leur échelle spatiale.

Les anomalies spatialisées des modèles Euro-Cordex, basées sur la médiane des résultats des différentes simulations des modèles climatiques régionaux Euro-Cordex (RCP 4.5 et RCP 8.5), constatées entre la période de référence et les horizons futurs, sont appliquées aux données générées par LISDQS qui fournit la cartographie du climat présent de référence par pas de temps.

Les cartes du climat présent et futur sont la somme des incertitudes liées à la qualité des mesures locales (stations de mesures), à l'interpolation spatiale des données, aux scénarios d'émissions, aux sorties des modèles globaux et régionaux (climat futur), et aux méthodes de correction des modèles globaux.

Esempi di indicatori e mappe

Des exemples d'indicateurs et de cartes

In totale, sono state prodotte 476 mappe mensili, stagionali e annuali di temperature dell'aria e di precipitazioni: per ogni parametro, le mappe illustrano il clima presente e futuro in funzione dei RCP e degli orizzonti futuri (2026-2045, 2046-2065, 2076-2095) sulle superfici terrestri.

La validazione incrociata (Figura 40) ha consentito di definire la qualità delle stime calcolate a partire dalle osservazioni delle stazioni meteo e dalle variabili esplicative su scala locale e globale. Sul territorio di riferimento del progetto MITIMPACT è quindi possibile valutare l'affidabilità per settore geografico.

Au total, 476 cartes mensuelles, saisonnières et annuelles de températures de l'air et de précipitations ont été produites : pour chaque paramètre, les cartes illustrent le climat présent et le climat futur en fonction des RCP et des horizons futurs (2026-2045, 2046-2065, 2076-2095) sur les surfaces terrestres.

La validation croisée (Figure 40) a permis de définir la qualité des estimations calculées à partir des observations des stations météo et des variables explicatives à l'échelle locale et globale. Sur le territoire de référence du projet MITIMPACT, il est donc possible d'évaluer la fiabilité par secteur géographique.

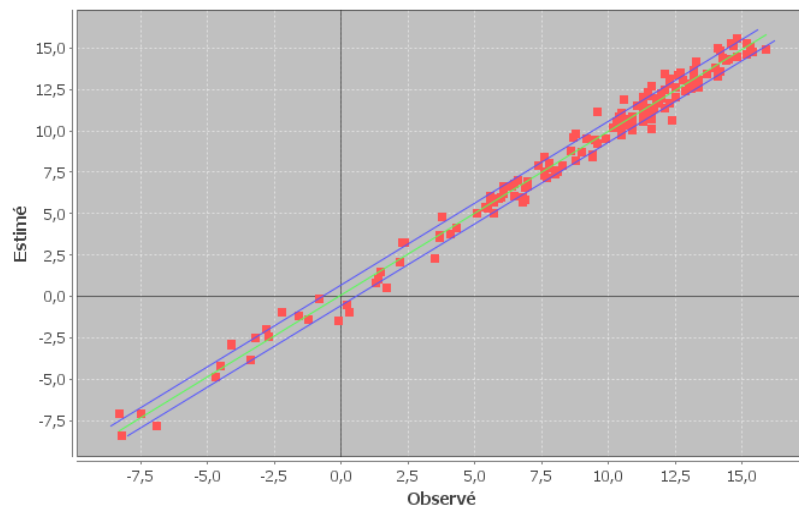


Figura 40. Esempio di validazione incrociata per la temperatura media in primavera per ciascuna delle stazioni meteo del territorio di studio (periodo di riferimento 1998-2017) : coefficiente di determinazione adattato : 0,99 / scostamento tipo dei residui : 0,63. I valori osservati e stimati sono espressi in °C.

Figure 40. Exemple de validation croisée pour la température moyenne au printemps pour chacune des stations météo du territoire étudié (période de référence 1998-2017) : coefficient de détermination ajusté : 0,99 / écart-type des résidus : 0,63. Les valeurs observées et estimées sont exprimées en °C.

La qualità delle stime mensili, stagionali e annuali per le temperature in generale è molto soddisfacente (esempio : RMSE globale di 0,7 per la temperatura media). Gli scostamenti tra valori osservati e stimati sono ridotti o molto ridotti, soprattutto per le temperature massime e medie. Per le temperature minime, la spazializzazione può potenzialmente presentare degli ostacoli in alcuni settori : in periodi di anticlone in inverno, ad esempio, le inversioni termiche ripetute alterano a volte la qualità delle stime nelle valli alpine. Per le precipitazioni, i risultati sono anch'essi soddisfacenti, in particolare a livello stagionale e annuale. Mensilmente, le interruzioni, a volte brusche sulle brevi distanze degli accumuli di precipitazioni possono essere perfettamente sfruttabili e consentono di anticipare gli effetti dei cambiamenti climatici.

Ecco alcuni indicatori sotto forma di cifre in funzione dei vari scenari (i dettagli dei risultati non sono riportati):

- nel 2085, senza la misura di attenuazione dei GES, la temperatura media potrebbe aumentare di 4 °C rispetto ad oggi, e ancora di più a livello locale. Le precipitazioni subirebbero un lieve calo degli accumuli annuali. Questa constatazione nasconde delle disparità stagionali, poiché, in estate, il calo potrebbe raggiungere -25 %;
- nel 2085, se le emissioni di GES fossero più controllate e moderate in futuro (RCP 4.5), la temperatura aumenterebbe di 1,6 °C rispetto ad oggi e gli accumuli di precipitazioni evolverebbero poco (stabili d'estate, in lieve aumento in inverno);
- senza riduzione delle emissioni di GES su scala globale e locale, la media delle temperature massime in estate balzerebbe in media di +5,7 °C all'orizzonte 2085 rispetto ad oggi, con degli aumenti localmente superiori a 7 °C, soprattutto in alta montagna;
- se nessuna politica di transizione energetica viene adottata, l'isoterma 25 °C, sinonimo di giornate calde in estate, guadagnerebbe terreno in quota: +400 m nel 2055 e +850 m nel 2085;
- secondo lo scenario socioeconomico più pessimista, in inverno il freddo si attenuerebbe: temperatura minima in aumento di 4,5 °C nel 2085. L'isoterma 0 °C in inverno, corrispondente al

mantenimento teorico della neve, subirebbe una rapida risalita altitudinale: +500 m nel 2055, +950 m nel 2085

La qualité des estimations est globalement très satisfaisante au pas mensuel, saisonnier et annuel pour les températures (exemple : RMSE global de 0,7 pour la température moyenne). Les écarts entre valeurs observées et estimées sont faibles ou très faibles, notamment pour les températures maximales et moyennes. Pour les températures minimales, la spatialisation peut potentiellement présenter des écueils dans certains secteurs : en période anticyclonique en hiver, par exemple, les inversions thermiques répétées altèrent parfois la qualité des estimations dans les vallées alpines. Pour les précipitations, les résultats sont également satisfaisants, surtout au pas saisonnier et annuel. Au pas mensuel, les ruptures parfois brutales sur de courtes distances des cumuls de précipitations compliquent l'interpolation spatiale à l'échelle locale, mais, malgré ce constat, les cartes mensuelles des précipitations restent parfaitement exploitables et permettent d'anticiper les effets du changement climatique.

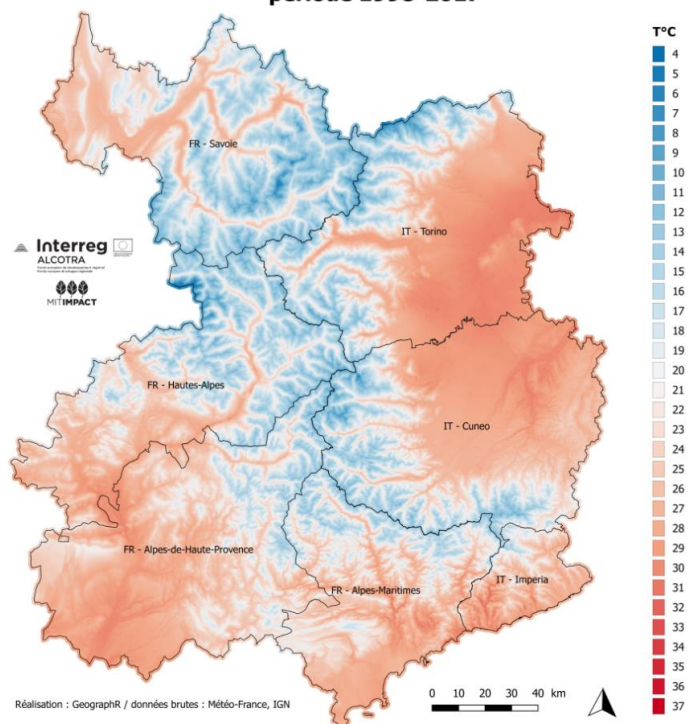
Il n'est pas question de détailler ici tous les résultats, mais voici quelques indicateurs chiffrés en fonction des différents scénarios :

- en 2085, sans mesure d'atténuation des GES, la température moyenne est susceptible d'augmenter de 4 °C par rapport à aujourd'hui, localement davantage. Les précipitations subiraient une légère baisse des cumuls annuels. Ce dernier constat masque des disparités saisonnières, car, en été, la baisse pourrait atteindre -25 % ;
- en 2085, si les émissions de GES sont mieux maîtrisées et contrôlées à l'avenir (RCP 4.5), la température augmenterait de 1,6 °C par rapport à aujourd'hui et les cumuls de précipitations évolueraient peu (stables en été, légère hausse en hiver) ;
- sans réduction des émissions de GES à l'échelle globale et locale, la moyenne des températures maximales en été bondirait en moyenne de +5,7 °C à l'horizon 2085 par rapport à aujourd'hui, avec localement des hausses supérieures à 7 °C, notamment en haute montagne ;
- si aucune politique de transition énergétique n'est mise en œuvre, l'isotherme 25 °C, synonyme de journées chaudes en été, gagnerait du terrain en altitude : +400 m en 2055 et +850 m en 2085 ;
- selon le scénario socio-économique le plus pessimiste, le froid reculerait en hiver : température minimale en hausse de 4,5 °C en 2085. L'isotherme 0 °C en hiver, correspondant au maintien théorique de la neige, subirait une rapide remontée altitudinale : +500 m en 2055, +950 m en 2085

Grazie alla risoluzione spaziale, le carte hanno il vantaggio di indicare il clima attuale e futuro in qualsiasi punto dello spazio (sottosistema d'informazione geografica, è possibile zoomare su scala di particella):

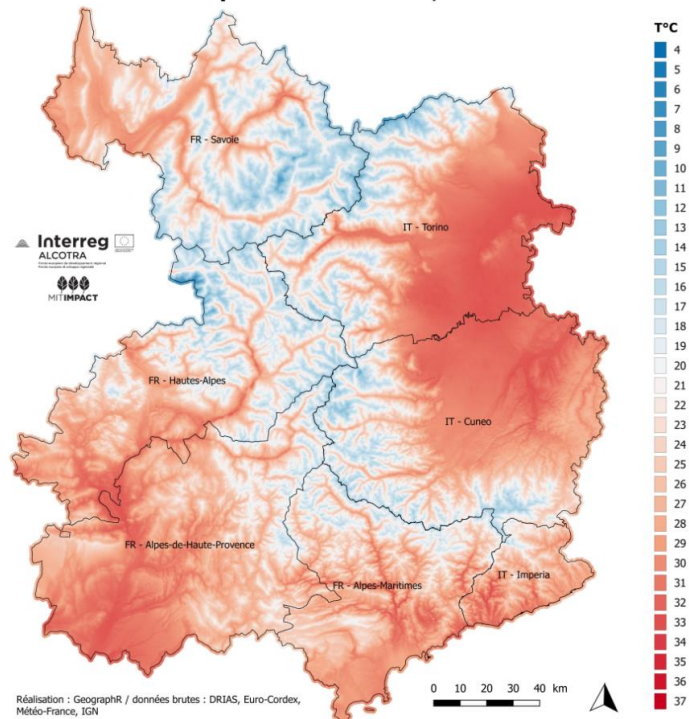
Grâce à leur résolution spatiale, les cartes ont l'avantage d'indiquer le climat actuel et futur en tout point de l'espace (sous système d'information géographique, il est possible de zoomer à l'échelle parcellaire) :

**Température maximale moyenne en été (°C),
période 1998-2017**



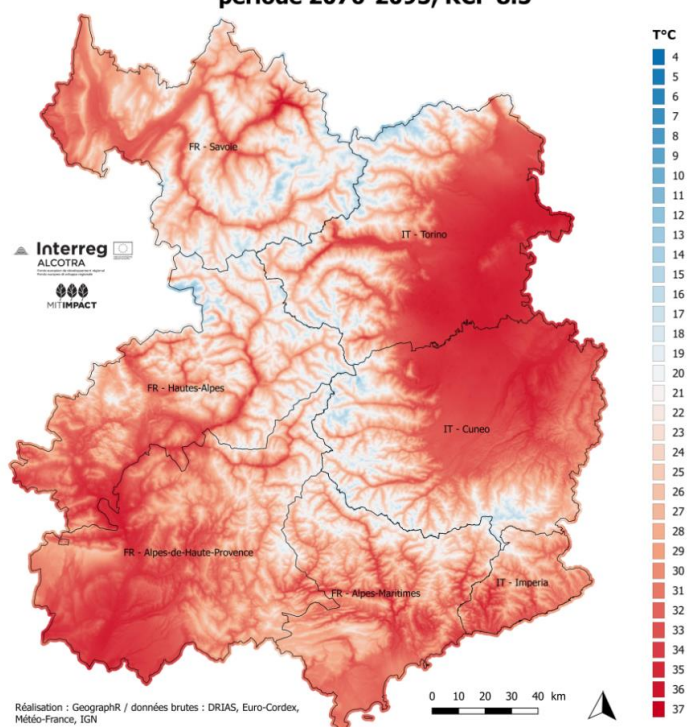
Temperature massime media in estate (1998-2017)

**Température maximale moyenne en été (°C),
période 2046-2065, RCP 8.5**



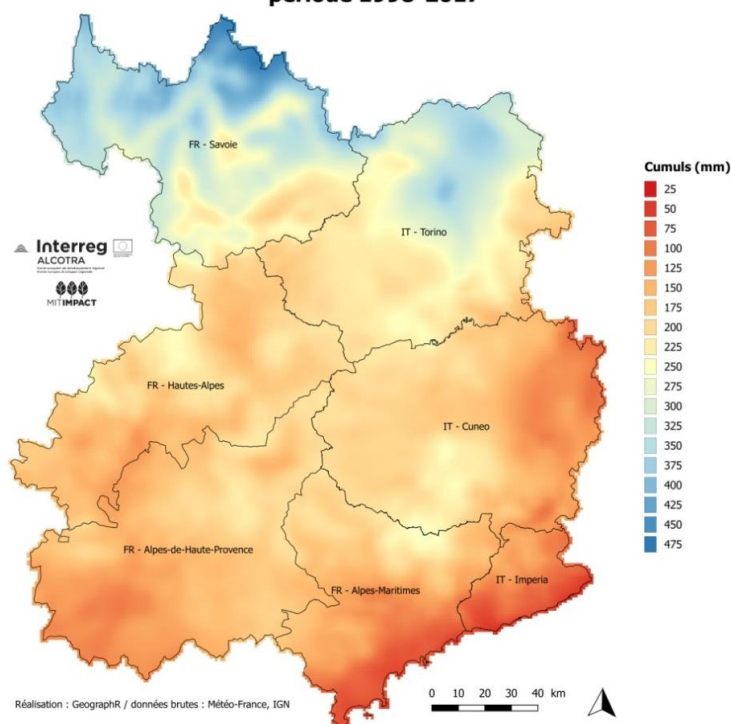
Temperature massime media in estate (2046-2065, RCP 8.5)

Température maximale moyenne en été (°C), période 2076-2095, RCP 8.5



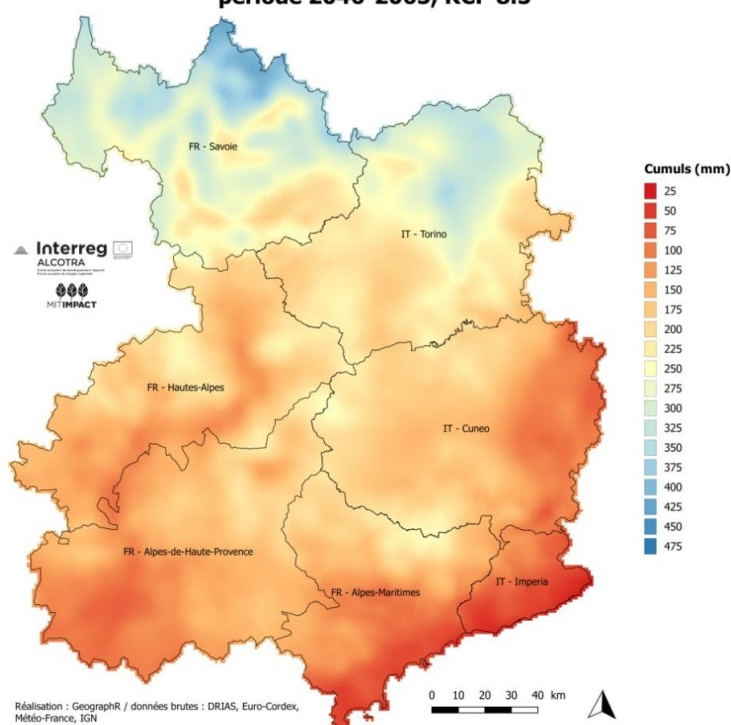
Temperature massime media in estate (2076-2095, RCP 8.5)

Cumuls moyens des précipitations en été (mm), période 1998-2017



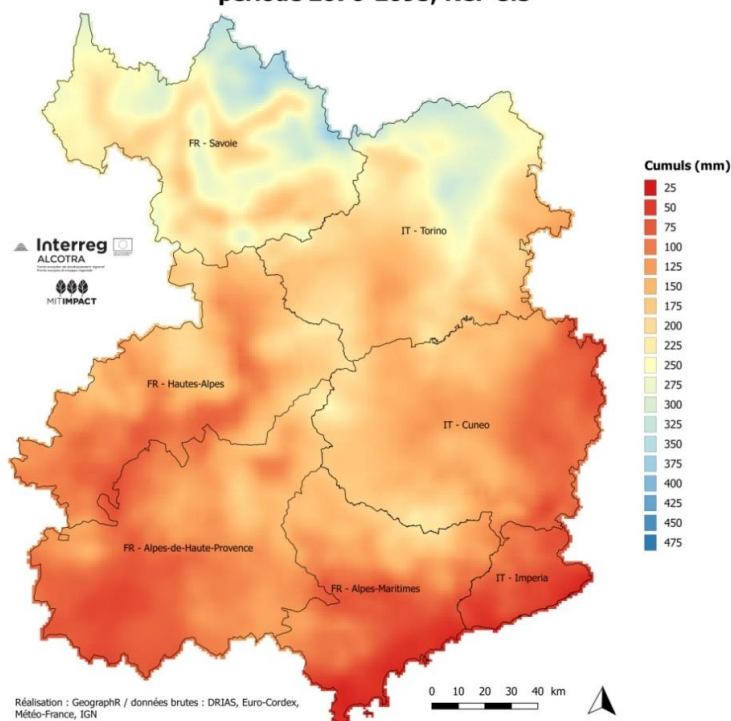
Accumuli medi di precipitazioni in estate (1998-2017)

Cumuls moyens des précipitations en été (mm), période 2046-2065, RCP 8.5



Accumuli medi di precipitazioni in estate (2046-2065, RCP 8.5)

Cumuls moyens des précipitations en été (mm), période 2076-2095, RCP 8.5



Accumuli medi di precipitazioni in estate (2076-2095, RCP 8.5)

L'evoluzione del clima delle Alpi transfrontaliere è inquietante in tutti gli scenari. In assenza di strategie di attenuazione e di adattamento efficaci in futuro, le fasce altitudinali della vegetazione nello spazio transfrontaliero sono destinate a evolvere. Le sfide in materia di protezione delle foreste e di salvaguardia

dei paesaggi sono quindi maggiori. Se le società non cambiano il loro modo di produrre e di consumare, probabilmente si arriverà al collasso della biodiversità, al degrado degli ecosistemi naturali, ma anche ad impatti pesanti sull'economia. Bisogna assolutamente evitare lo scenario RCP 8.5.

L'évolution du climat des Alpes transfrontalières est inquiétante, tous scénarios confondus. En l'absence de stratégies d'atténuation et d'adaptation efficaces à l'avenir, les étages de la végétation sur l'espace transfrontalier sont appelés à évoluer. Les enjeux en matière de protection des forêts et de préservation des paysages sont donc majeurs. Si les sociétés ne changent pas leur mode de production et de consommation, un effondrement de la biodiversité, une dégradation parfois fatale des écosystèmes naturels, mais aussi des impacts sévères sur l'économie, sont probables. Il faut à tout prix éviter le scénario RCP 8.5.